



حكومة إقليم كوردستان ــ العراق
وزارة التربية ـ المديرية العامة للمناهج والمطبوعات

العلـــوم للجميـــع

الفيزياء

كتاب الطالب - الصف الثاني عشر العلمي

الطبعة الخامسة
٢٠١٥م / ٢٧١٥ كوردي / ١٤٣٦ هـ

الأشراف الفني على الطبع
عثمان پيرداود كواز
آمانج اسماعيل عبدي

رموزٌ بيانيَّةٌ

أُدرجتِ المعلوماتُ في الجدولِ التالي بحسبِ ترتيبِها في كتابِ الطالبِ للمرحلةِ الثانويَّةِ.

الميكانيكا

الرمز	الدلالة
	متَّجهُ الإزاحةِ مركَّبةُ الإزاحةِ
	متَّجهُ السرعةِ مركَّبةُ السرعةِ
	متَّجهُ التعجيلِ
	متَّجهُ القوّةِ مركَّبةُ القوّةِ
	متَّجهُ الزخمِ الخطّي
	الزاوية
	اتِّجاهُ الدورانِ

الموجاتُ والكهرومغناطيسيَّةُ

الرمز	الدلالة
	شعاع (ضوء أو صوت)
+	الشحنةُ الموجبةُ
−	الشحنةُ السالبةُ
	خطوطُ المجالِ الكهربائيِّ
	متَّجهُ المجالِ الكهربائيِّ
	التيّارُ الكهربائيُّ
	خطوطُ المجالِ المغناطيسيِّ
	متَّجهُ المجالِ المغناطيسيِّ إلى داخلِ الصفحةِ إلى خارجِ الصفحةِ

الديناميكا الحراريَّةُ

الرمز	الدلالة
	الطاقةُ المتحوِّلةُ إلى حرارةٍ
	الطاقةُ المتحوِّلةُ إلى شغلٍ
	الدورةُ أو العمليَّةُ

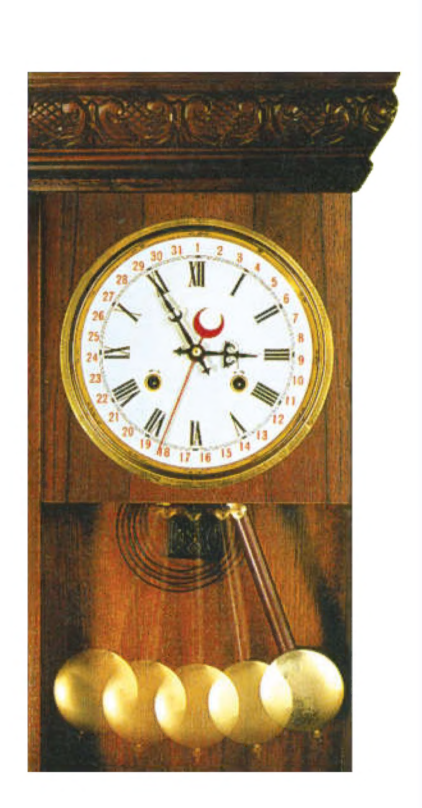
الاتجاهات

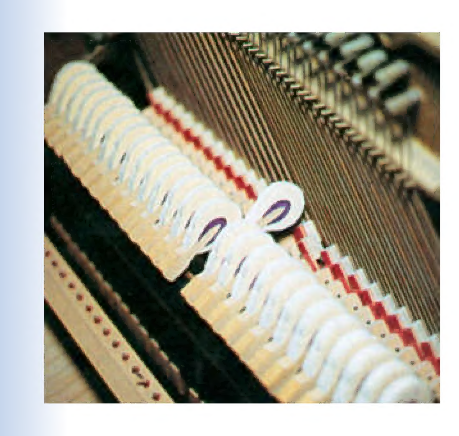
الرمز	الدلالة
$+x$	نحو الشرق «نحو اليمين»
$-x$	نحو الغرب «نحو اليسار»
$+y$	نحو الشمال «نحو أعلى الصفحة»
$-y$	نحو الجنوب «نحو أسفل الصفحة»

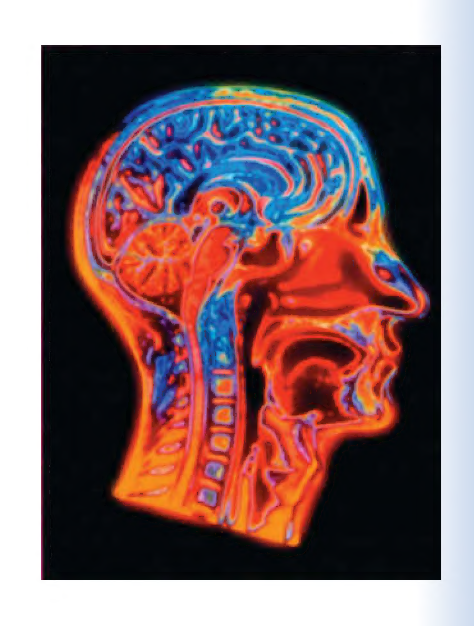
الرمز	الدلالة
$+z$	نحو خارج الصفحة «نحو المراقب» نحو الأعلى «نحو السماء»
$-z$	نحو داخل الصفحة «بعيدًا عن المراقب» نحو الأسفل «نحو الأرض»
$+y$، $+x$، $+z$	



المحتويات

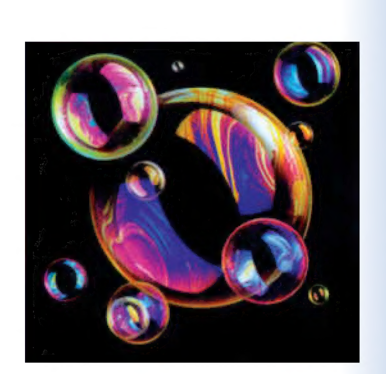




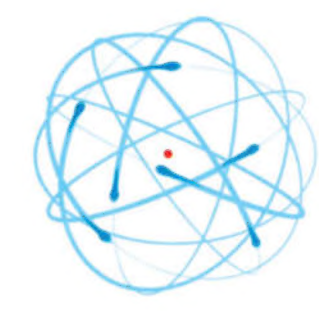


6 الحثُّ الكهرومغناطيسيُّ 150

7 التداخل والحيود 196



8 الفيزياءُ الذرّيَّةُ 222



9 الإلكترونيات الحديثة 248

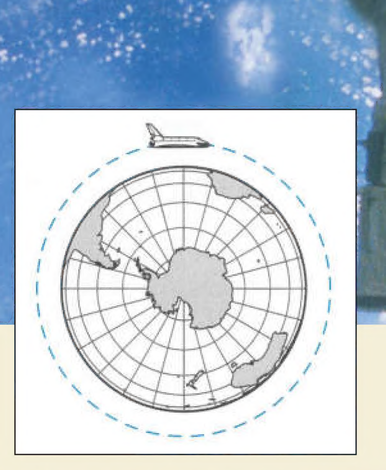
قسمُ الملاحقِ 274



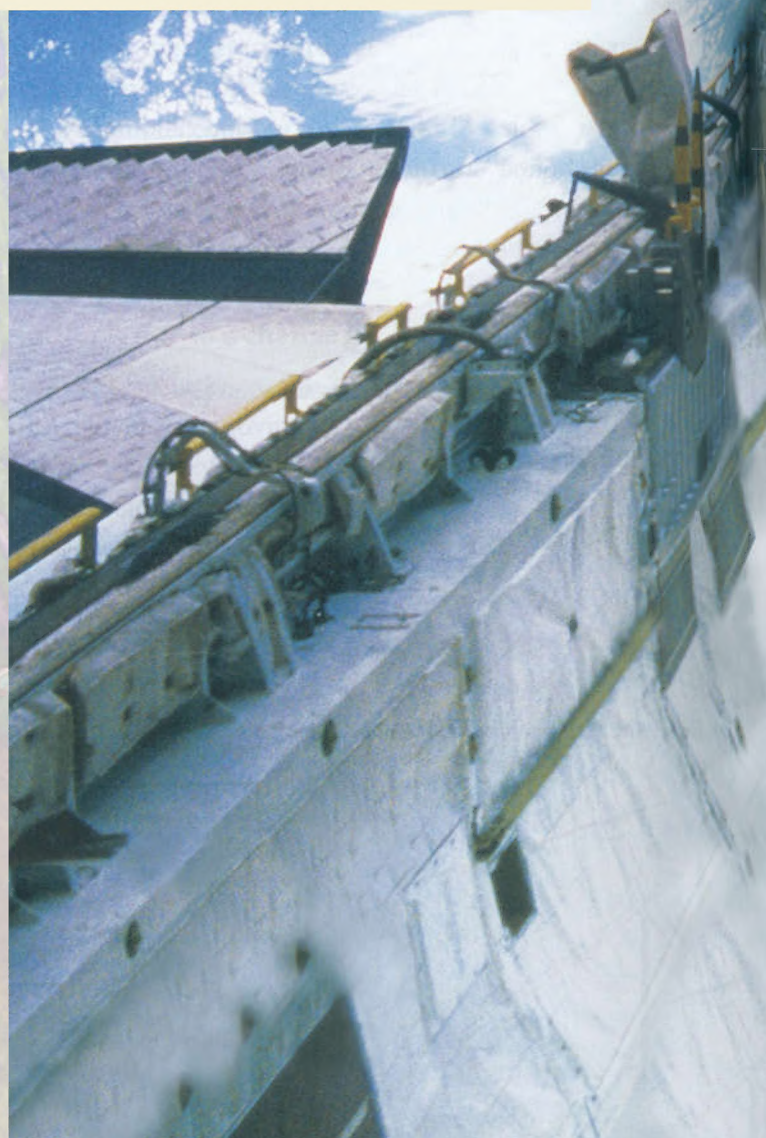
الفصـــــل 1

الحركةُ الدَّوَرانية وقانون الجاذبية

Rotational Motion and the Law of Gravity



يسيرُ رائدُ الفضاءِ الظاهرُ في الصورةِ على ممرِّ الحمولةِ، في مكّوكٍ فضائيٍّ ليحاولَ إصلاحَ قمرٍ اصطناعيٍّ. ومع أنَّ محاولةَ الرائدِ الأول لالتقاطِ القمرِ لم تنجحْ، فقد تمَّ إنجازُ المهمَّةِ لاحقاً باستعمالِ ذراعٍ روبوتيّ. عندها تمكَّنَ رائدُ الفضاءِ من إصلاحِ القمرِ الاصطناعيّ.



ما يُتوقَّعُ تحقيقُهُ

ستدرسُ في هذا الفصلِ وصفَ الحركةَ الدائريَّة والقوى المسبِّبةَ لها، بما فيها قوَّةُ الجاذبيَّة.

ما أهميَّتُهُ

نرى الحركةَ الدائريَّةَ في كلِّ مكانٍ من حولنا، بدءًا بالدولابِ الدوّارِ ذي المقاعدِ في مدينةِ الألعاب وانتهاءً بدورانِ مكّوكٍ فضائيٍّ يدورُ حولَ الأرضِ، ودورانِ الأرضِ حولَ الشمس.

محتوى الفصل 1



قياسُ الحركةِ الدَّورانية

Measuring Rotational Motion

1-1 أهداف القسم

- يربطُ الراديَن بالدرجات.
- يحسُبُ الإزاحةَ الزاويّةَ باستعمالِ طولِ القوسِ والمسافةِ انطلاقًا من محورِ الدوران.
- يحسُبُ السرعةَ الزاويّةَ والتعجيل الزاويّ.
- يحلُّ مسائلَ مستعملاً معادلاتِ الحركةِ الدورانية.

الحركةُ الدورانية

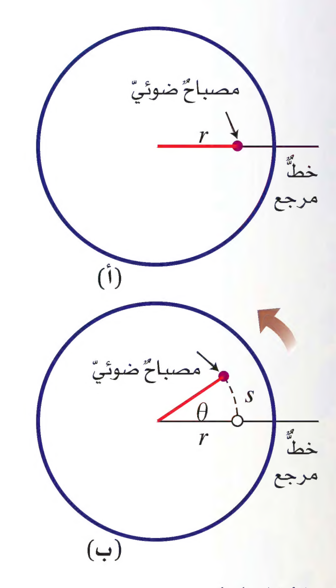
حركةُ جسمٍ يدورُ حول محورٍ معيّن.

الكمّياتُ الدورانية

عندما يدورُ جسمٌ نقولُ إنه يتعرَّضُ **لحركةٍ دَوَرانية** rotational motion. يدورُ الدولابُ الهوائيُّ في مدينةِ ألعابٍ حول محورِهِ العموديِّ الثابتِ المارِّ في مركزِهِ والذي يسمّى محورَ الدَّوَران. كيف يمكنُنا قياسُ المسافةِ التي يقطعُها جسمٌ مثبّتٌ في محيطِ الدولاب؟

نقاطُ الجسمِ الذي يدورُ حول محورٍ ثابت تسيرُ وفق حركةٍ دائريةٍ حول هذا المحور. وتكونُ حركةُ كلِّ نقطةٍ من هذا الجسمِ دائريةً حول المحور، بغضِّ النظرِ عن شكلِ الجسم. من الصعبِ وصفُ الحركةِ الدائريةِ لنقطةٍ باستعمالِ الكمّياتِ الخطّيةِ وحدَها الواردةِ في كتابِ الصفِّ الحادي عشر، لأن اتجاهَ الحركةِ في مسارٍ دائريٍّ يتغيَّرُ باستمرار. لذلك يتمُّ وصفُ الحركةِ الدائريةِ بدلالةِ زاويةِ دورانِ النقطة. عندما تدورُ كلُّ نِقاطِ جسمٍ صلب، باستثناء النقاطِ الواقعةِ على محورِ الدوران، بالزاويةِ نفسِها خلال الفترةِ الزمنيةِ نفسِها.

في **الشكل 1-1**، يدورُ مصباحٌ ضوئيٌّ موجودٌ على مسافةِ r من مركزِ دولابٍ هوائيّ، كما في **الشكل 2-1**، حول المحورِ في دائرةٍ نصفُ قطرها r. في الواقعِ كلُّ نقطةٍ من نِقاط الدولابِ تجري في حركةٍ دائريةٍ حول المركز. لتحليلِ هذه الحركة، يُختارُ لها خطٌّ مرجعٌ ثابت. نفترضُ أنه عند اللحظةِ $t = 0$ تكونُ النقطةُ على الخطِّ المرجعِ الذي يصلُ مركزَ الدولابِ بالمصباح، كما في **الشكل 1-1** (أ). بعد مدةٍ Δt ينتقلُ المصباحُ إلى موقعٍ آخر، كما في **الشكل 1-1** (ب). خلال هذه المدَّةِ يدورُ الخطُّ الأحمرُ الذي يصلُ المصباحَ بالمركز بزاويةٍ θ بالنسبةِ إلى الخطِّ المرجع، كما يقطعُ المصباحُ مسافةَ s يتمُّ قياسُها على محيطِ الدائرة، حيث تمثّلُ s طولَ القوسِ المقطوع.



الشكل 1-1

مصباحٌ ضوئيٌّ على دولابِ دوران.
(أ) يبدأ المصباحُ حركتَهُ على الخطِّ المرجع.
(ب) يقطعُ المصباحُ طولَ القوسِ s من خلالِ دورانِهِ بزاويةِ θ.

تقاسُ الزوايا بالراديَن (radians)

قمنا، إلى الآن، بقياسِ الزوايا بوحدةِ الدرجات (°). لكنَّ الزوايا تُقاس غالبًا بوحدةٍ أخرى تُسمّى **الراديَن** radian. معظمُ المعادلاتِ في هذا الفصل والفصلِ الذي يليهِ تتطلبُ زوايا مقيسةً بالراديَن. في **الشكل 1-1** (ب)، حين يتساوى طولُ القوسِ s



الشكل 2-1

تسيرُ كلٌّ من نقاطِ الدولاب، الذي يدورُ حول محورٍ ثابت، في حركةٍ دائرية.

ونصفُ القطر r، تكونُ الزاويةُ θ التي يقطعُها r تساوي 1 rad. وبشكلٍ عام، تعرفُ أيُّ زاويةٍ مقيسةٍ بالرادْيَن بالمعادلةِ التالية:

$$\theta = \frac{s}{r}$$

الرادْيَن هو مجرّدُ رقمٍ ليس له بُعد في نظام SI. و θ هي نسبةُ طولِ قوسٍ، أي مسافةٍ، إلى طولِ نصفِ القطرِ، وهو مسافةٌ أيضًا. لذلك تُختصرُ الوحدتانِ ويحلُّ محلَّهما التعبيرُ المختصر rad.

عندما يدورُ المصباحُ على الدولابِ بزاويةِ 360°، أي دورةً كاملةً للدولاب، يكونُ طولُ القوسِ مساويًا لمحيطِ الدائرة $2\pi r$. وبتعويضِ هذه القيمةِ لـ s في العلاقةِ السابقةِ نحصلُ على قيمةِ θ بالرادْيَن.

$$\theta = \frac{s}{r} = \frac{2\pi r}{r} = 2\pi$$

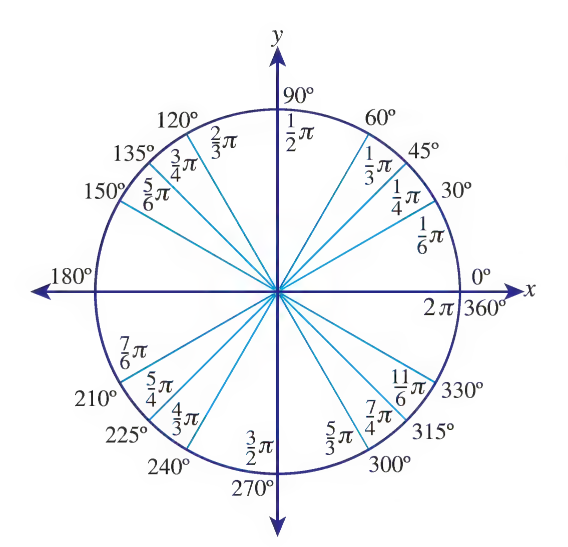
بناءً على ذلك فإن الزاوية 360° تساوي 2π rad أو دورةً كاملة. أي إن الزاويةَ المكافئةَ لدورةٍ كاملةٍ تساوي تقريبًا 2(3.14) = 6.28 rad.

يُظهرُ **الشكل 1-3** دائرةً مدرَّجةً بالدرجاتِ والرادْيَن. لذلك يمكنُ تحويلُ مقدارِ أيِّ زاويةٍ من درجاتٍ إلى رادْيَن، وذلك بضربِ مقدارِ الزاويةِ المقيسةِ بالدرجات في الكمية $2\pi/360°$. عندئذٍ تُختصرُ الدرجاتُ ويصبحُ القياسُ بالرادْيَن. ويمكنُ اختصارُ علاقةِ التحويلِ هذه كما يلي:

$$\theta_{rad} = \frac{\pi}{180°}\ \theta°$$

الرادْيَن

زاويةٌ مركزيةٌ طولُ قوسِها يساوي نصفَ قطرِ دائرتِها. وهي تساوي بالدرجاتِ 57.3° تقريبًا.



الشكل 1-3

تقاسُ الحركةُ الدائريةُ بالرادْيَن. ولأن كلَّ دورةٍ كاملةٍ تساوي 2π rad، فغالبًا ما يُعبَّرُ عن الرادْيَن بأمثالِ π.

نشاط عملي سريع

الرادْيَن وطول القوس

الموادّ

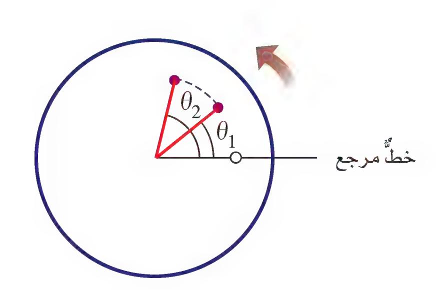
- ✓ فرجارٌ للرسم
- ✓ ورقة
- ✓ سلكٌ دقيق
- ✓ قطّاعةُ أسلاك، أو مِقَصّ

استعمل الفرجارَ لرسم دائرةٍ على ورقة، وعيِّنْ مركزَ الدائرة. قِسْ نصفَ قطر الدائرة، وهو المسافةُ من مركزِ الدائرة إلى أيِّ نقطةٍ من محيطِها. استعمل القطّاعةَ لقطع عدةِ أسلاكٍ طولُ كلٍّ منها يساوي نصفَ قطرِ الدائرة. اثنِ تلك الأسلاكَ وضعْها مطابقةً للدائرةِ المرسومة. إلى كم من تلك الأسلاكِ تحتاجُ لتغطّيَ محيطَ الدائرةِ كاملاً؟

ارسمْ خطوطًا من مركزِ الدائرةِ إلى كلٍّ من أطرافِ الأسلاكِ المنحنيةِ المطابقةِ للدائرة. لاحظْ أن الزاويةَ بين أيِّ خطين متتاليين من هذه الخطوط تساوي 1 rad. ما عددُ هذه الزوايا على امتدادِ الدائرة؟ ارسمْ دائرةً أكبرَ بوساطةِ الفرجار. إلى كم سلكٍ تحتاجُ (طولُ كلٍّ منها يساوي نصفَ القطر) لتغطّيَ محيطَ الدائرةِ بكاملِه؟

الإزاحةُ الزاويّة

زاويةُ دورانِ نقطةٍ أو محورٍ أو جسمٍ في اتجاهٍ معيّنٍ حول محورٍ ثابت.



الشكل 4-1

يدورُ المصباحُ الضوئيُّ على دولابِ الدوران بإزاحةٍ زاويّةٍ هي $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$.

الإزاحةُ الزاويّةُ والدوران

كما أن الزاويةَ بالرادْيَن تساوي نسبةَ طولِ القوسِ إلى نصفِ القطر، **فالإزاحةُ الزاويّةُ** angular displacement التي يقطعُها المصباحُ المثبّتُ على دولابِ الدورانِ تساوي التغيُّرَ في طولِ القوسِ Δs مقسومًا على المسافةِ بين المصباحِ ومحورِ الدوران. هذه العلاقةُ تظهرُ في **الشكل 4-1**.

الإزاحةُ الزاويّة

$$\Delta\theta = \frac{\Delta s}{r}$$

$$\text{الإزاحةُ الزاويّة (بالرادْيَن)} = \frac{\text{التغيُّر في طول القوس}}{\text{المسافة بين الجسم ومحور الدوران}}$$

نفترضُ في هذا الكتاب، عند النظرِ إلى جسمٍ يدورُ من الجهةِ العليا، أن طولَ القوسِ يكونُ موجبًا إذا كان الجسمُ يدورُ بعكسِ اتجاهِ دورانِ عقاربِ الساعة، وسالبًا عند دورانِه في اتجاهِ دورانِ عقاربِ الساعة. بناءً عليه تكونُ $\Delta\theta$ موجبةً إذا تمَّ الدورانُ في اتجاهٍ معاكسٍ لدورانِ عقاربِ الساعة، وسالبةً عند الدورانِ في اتجاهِ عقاربِ الساعة.

مثال 1 (أ)

الإزاحةُ الزاويّة

المسألة

يركبُ شازاد حصانًا-لعبةً ويدورُ في اتجاهِ عقاربِ الساعةِ على قوسٍ طولُهُ 11.5 m. إذا كانتِ الإزاحةُ الزاويّةُ لشازاد 165°، فكم يكونُ نصفُ قطرِ الدوران؟

الحــلّ

1. أعرف

المعطى: $\Delta\theta = -165^\circ$ $\quad \Delta s = -11.5 \text{ m}$

المجهول: $r = ?$

2. أخطط

أحوِّلُ الإزاحةَ الزاويّةَ إلى رادْيَن باستعمالِ العلاقةِ المذكورةِ في الصفحة 5.

$$\Delta\theta \text{ (rad)} = \frac{\pi}{180^\circ} \times \Delta\theta \text{ (deg)} = \frac{\pi}{180^\circ}(-165^\circ)$$

$$\Delta\theta \text{ (rad)} = -2.88 \text{ rad}$$

أستعملُ معادلةَ الإزاحةِ الزاويّةِ في أعلى الصفحة، وأعيدُ ترتيبَها.

$$\Delta\theta = \frac{\Delta s}{r}$$

3. أحسب

$$r = \frac{\Delta s}{\Delta\theta} = \frac{-11.5 \text{ m}}{-2.88 \text{ rad}}$$

$$\boxed{r = 3.99 \text{ m}}$$

جوابُ الآلةِ الحاسبة

تشتملُ معظمُ الآلاتِ الحاسبةِ على مفتاحٍ مُعَنْوَنٍ ‹DEG يحوِّلُ الوحداتِ من درجاتٍ إلى رادْيَن.

تطبيق 1 (أ)

الإزاحةُ الزاويّة

1. تقفُ جرادةٌ على حافّةِ دولاب دراجةٍ هوائيةٍ يدورُ في اتجاهِ دوران عقاربِ الساعة. تبلغُ الإزاحةُ الزاويّةُ للجرادةِ π rad، وطولُ القوسِ المكافئِ 1.2 m. ما نصفُ قطرِ دولابِ الدراجة؟
2. املأ الفراغات في الجدول التالي بالكمّيات المجهولة.

	r	Δs	$\Delta\theta$
أ.	0.10 m	+0.25 m	? rad
ب.	8.5 m	?	+0.75 rad
ج.	0.75 m	– 4.2 m	? deg
د.	?	+2.6 m	+135°

السرعةُ الزاويّةُ ومعدلُ الدوران

تصفُ السرعةُ الخطّيةُ المسافةَ المقطوعةَ في مدّةٍ محدَّدة. **والسرعةُ الزاويّة** angular speed تُعرّفُ بطريقةٍ مشابهة. فتكونُ السرعةُ الزاويّةُ المتوسطةُ لدورانِ جسمٍ صلبٍ ω_{avg} (ω حرفٌ يونانيٌّ يُسمّى أوميكا) حاصلَ نسبةِ الإزاحةِ الزاويّةِ $\Delta\theta$ إلى المدَّةِ Δt اللازمةِ ليقطعَ الجسمُ هذه الإزاحة. تصفُ السرعةُ الزاويّةُ سرعةَ دورانِ الجسم.

السرعةُ الزاويّة

المعدَّلُ الزمني لدورانِ جسمٍ حولَ محورٍ معيَّن أو المعدَّلُ الزمني لتغيرِ الإزاحة الزاوية، وتقاسُ بالرادْيَن في الثانية.

السرعةُ الزاويّة

$$\omega_{avg} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$$

السرعةُ الزاويّةُ المتوسّطة = الإزاحةُ الزاويّة / المدةُ الزمنية

تكونُ وحدةُ قياسِ السرعةِ الزاويةِ رادْيَن في الثانية (rad/s). وتُعطى السرعةُ الزاويّةُ أحيانًا بوحدةِ الدوراتِ في الثانية. تذكّرْ أن كلَّ دورةٍ تساوي 2π rad ($1\ \text{rev} = 2\pi\ \text{rad}$).

مثال 1 (ب)

السرعةُ الزاويّة

المسألة

رزكار يجلسُ على كرسيٍّ دوّارٍ يدورُ في اتجاهٍ معاكسٍ لدورانِ عقاربِ الساعةِ بسرعةٍ زاويّةٍ متوسّطة 4.0 rad/s. ما المدّةُ اللازمةُ كي يقطعَ رزكار إزاحةً زاويّةً 8.0π rad؟

الحـــلّ

1. أعرف

المعطى: $\Delta\theta = 8.0\pi \text{rad}$ $\quad$ $\omega_{avg} = 4.0 \text{ rad/s}$

المجهول: $\Delta t = ?$

2. أخطط

أستعملُ معادلةَ السرعةِ الزاويةِ في الصفحة 7، وأعيدُ ترتيبَها لحسابِ Δt.

$$\omega_{avg} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$$

$$\Delta t = \frac{\Delta\theta}{\omega_{avg}}$$

3. أحسب

$$\Delta t = \frac{8.0\pi \text{ rad}}{4.0 \text{ rad/s}} = 2.0\ \pi \text{ s}$$

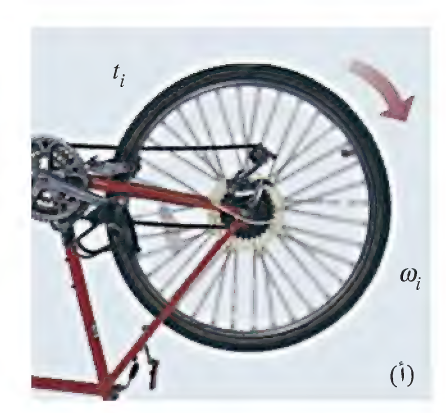
$$\boxed{\Delta t = 6.3 \text{ s}}$$

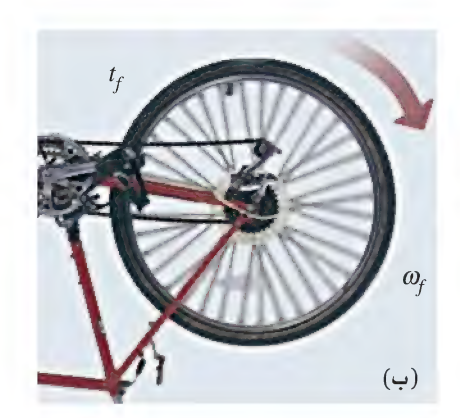
تطبيق 1 (ب)

السرعةُ الزاويّة

1. يدورُ دولابُ سيارةٍ بسرعةٍ زاويّةٍ متوسطة 29 rad/s. ما المدَّةُ اللازمةُ كي يدورَ الدولابُ ثلاثَ دوراتٍ ونصفًا؟
2. املأ الفراغات في الجدول التالي بالكمّيات المجهولة.

	Δt	$\Delta\theta$	ω_{avg}
أ.	10.0 s	+2.3 rad	?
ب.	0.050 s	?	+0.75 rad/s
ج.	1.2 s	–1.2 rev	?
د.	?	$+1.5\pi$ rad	$+2\pi$ rad/s





الشكل 1-5
يدورُ دولابُ دراجةٍ متسارعٍ بسرعةٍ زاويةٍ
(أ) ω_i عند لحظة t_i.
(ب) ω_f عند لحظة t_f.

التعجيلُ الزاويُّ وتغيُّرُ السرعةِ الزاويّة

يظهرُ في **الشكل 1-5** دراجةٌ هوائيةٌ مقلوبةٌ رأسًا على عقب لإصلاحِ دولابِها الخلفيّ. تدارُ الدوّاساتُ بحيثُ تكونُ السرعةُ الزاويّةُ للدولاب ω_i في اللحظة t_i، كما في **الشكل 1-5** (أ)، و ω_f في لحظةٍ لاحقة t_f، كما في **الشكل 1-5** (ب).

التعجيلُ الزاويّ

المعدّلُ الزمني لتغيُّرِ السرعةِ الزاويّة، وتقاسُ بالراديّن في ثانية².

يعرَّفُ متوسطُ **التعجيل الزاويّ** angular acceleration α_{avg} (α حرف يوناني يُسمّى ألفا) للجسمِ كما في المعادلةِ التالية. تكونُ وحدةُ قياسِ التعجيل الزاويِّ راديّن في ثانية² (rad/s^2).

التعجيلُ الزاويّ

$$\alpha_{avg} = \frac{\omega_f - \omega_i}{t_f - t_i} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$$

متوسطُ التعجيلِ الزاويّ = التغيُّر في السرعة الزاوية / المدة الزمنية

مثال 1 (ج)

التعجيلُ الزاويّ

المسألة

يدورُ دولابُ سيارةٍ بسرعةٍ زاويةٍ ابتدائية 21.5 rad/s. يتسارعُ السائقُ فتصبحُ السرعةُ الزاويّةُ 28.0 rad/s بعد 3.5 s. ما متوسطُ التعجيل الزاويّ للدولاب خلال المدةِ المذكورة؟

الحـــلّ

1. أعرف

المعطى: $\omega_1 = 21.5\ rad/s$ $\quad \omega_2 = 28.0\ rad/s$ $\quad \Delta t = 3.5\ s$

المجهول: $\alpha_{avg} = ?$

2. أخطط

أستعملُ معادلةَ التعجيلِ الزاويِّ التي في هذه الصفحة.

3. أحسب

$$\alpha_{avg} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\Delta t} = \frac{28.0\ rad/s - 21.5\ rad/s}{3.5\ s} = \frac{6.5\ rad/s}{3.5\ s}$$

$$\boxed{\alpha_{avg} = 1.9\ rad/s^2}$$

تطبيق 1 (ج)

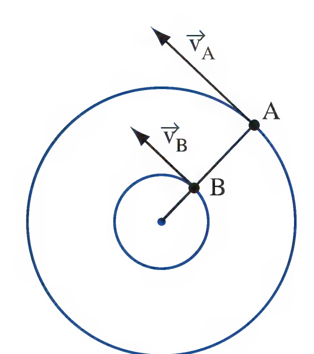
التعجيلُ الزاويّ

1. املأ الجدول التالي بالكميات المجهولة.

	Δt	$\Delta\omega$	α_{avg}
أ.	7.0 s	+121.5 rad/s	?
ب.	0.050 s	?	$+0.75\ rad/s^2$
ج.	1.2 s	−1.2 rev/s	?

السرعةُ الزاويتين والتعجيلُ الزاويُّ لِنقاطِ جسمٍ صلبٍ يدورُ حول محور

إذا كانَ لنقطةٍ مثل A عند حافةِ دولابِ دراجةٍ سرعةٌ زاويّةٌ أكبرُ من سرعةِ نقطةٍ مثل B القريبة من المركز كما في **الشكل 1-6**، فإن شكلَ الدولابِ سيتغيّر. ولكي تحافظَ الأجسامُ على صلابتِها أثناء الدوران، كما في حالةِ دولابِ الدراجةِ أو الدولابِ الهوائيّ، يجبُ أن تدورَ جميعُ نقاطِ الجسمِ بالسرعةِ الزاويّةِ نفسِها وبالتعجيلِ الزاويّ نفسِه في أيِّ لحظةٍ زمنية. وهذا ما يزيدُ من أهمّيةِ السرعةِ الزاويةِ والتعجيلِ الزاويِّ لدى وصفِ الحركةِ الدورانية.



الشكل 1-6

النقطتان A و B لهما السرعة الزاويّة نفسها.

مقارنةُ الكمّياتِ الدورانيةِ بالكمّياتِ الخطيةِ

قارنْ بين المعادلاتِ التي حصلنا عليها حتى الآن، في حالةِ الحركةِ الدورانية، وبين تلك التي حصلنا عليها في كتابِ الصفِّ الحادي عشر. قارنْ، مثلاً، بين تعريفَيِ السرعةِ الزاويّةِ المتوسّطةِ والسرعةِ الخطّيةِ المتوسّطة:

$$\omega_{avg} = \frac{\theta_f - \theta_i}{t_f - t_i} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \qquad v_{avg} = \frac{x_f - x_i}{t_f - t_i} = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

هاتانِ المعادلتانِ متشابهتان، لأنّ θ تَحُلُّ محلَّ x و ω تَحُلُّ محلَّ v. لاحِظْ هذه الكمّياتِ بدقّةٍ أثناء دراسةِ الحركةِ الدورانية، ذلك أن لكل كمّيةٍ خطّيةٍ تعرَّفنا إليها حتى الآن توأمًا دورانيًّا مشابهًا، كما في **الجدول 1-1**.

الجدول 1-1

الكمّياتُ الدورانيةُ المكافئةُ للكمّياتِ الخطية

خطّي	دوراني
x	θ
v	ω
a	α

المعادلاتُ في حالةِ التعجيل الزاويِّ الثابت

في ضوءِ التشابهِ بين المتغيّراتِ في الحركةِ الخطّيةِ والمتغيّراتِ في الحركةِ الدورانية، نتوقّعُ تشابهًا مماثلاً بين علاقاتِ الحركةِ الدورانيةِ والحركةِ الخطّيةِ التي تمَّت دراستُها

في الصفِّ الحادي عشر. يلخصُ **الجدول 2-1** علاقاتِ الحركةِ في حالتَي التعجيل الثابت للحركةِ الخطّيةِ والتعجيلِ الزاويِّ الثابتِ للحركةِ الدورانية. لاحظ أن علاقاتِ الحركةِ الدورانيةِ تطبّق فقط في حالةِ الدوران حول محورٍ ثابت.

الجدول 2-1 معادلةُ الحركتينِ الدورانيةِ والخطّية

الحركةُ الدورانيةُ بتعجيل زاويٍّ ثابت	الحركةُ الخطّيةُ بتعجيل ثابت
$\omega_f = \omega_i + \alpha\Delta t$	$v_f = v_i + a\Delta t$
$\Delta\theta = \omega_i\Delta t + \frac{1}{2}\alpha(\Delta t)^2$	$\Delta x = v_i\Delta t + \frac{1}{2}a(\Delta t)^2$
$\omega_f^2 = \omega_i^2 + 2\alpha(\Delta\theta)$	$v_f^2 = v_i^2 + 2a(\Delta x)$
$\Delta\theta = \frac{1}{2}(\omega_i + \omega_f)\Delta t$	$\Delta x = \frac{1}{2}(v_i + v_f)\Delta t$

لاحظِ التشابهَ بين علاقاتِ الحركةِ الدورانيةِ التي تشتملُ على المتغيِّرات θ و ω و α وعلاقاتِ الحركةِ الخطّيةِ ذاتِ المتغيِّرات x و v و a. تمثّلُ الكمّيةُ ω في معادلاتِ **الجدول 2-1** السرعةَ الزاويّةَ اللحظيةَ لدورانِ الجسم، بدلاً من السرعةِ الزاويّةِ المتوسّطة.

مثال 1 (د)

معادلاتُ الحركةِ الدورانية

المسألة

يقطعُ دولابُ درّاجةٍ مقلوبة 11.0 rad خلال 2.0 s. ما التعجيلُ الزاويُّ للدولابِ إذا كانت سرعتُهُ الزاويّةُ الابتدائية 2.00 rad/s؟

الحلّ

1. أعرف

المعطى: $\Delta\theta = 11.0\ \text{rad}$ $\quad \Delta t = 2.0\ \text{s}$ $\quad \omega_i = 2.00\ \text{rad/s}$

المجهول: $\alpha = ?$

2. أخطّط

أستعملُ المعادلةَ التاليةَ في **الجدول 2-1** وأحسُبُ α.

$$\Delta\theta = \omega_i\Delta t + \frac{1}{2}\alpha(\Delta t)^2$$

$$\alpha = \frac{2(\Delta\theta - \omega_i\Delta t)}{\Delta t^2}$$

3. أحسب

$$\alpha = \frac{2[11.0\ \text{rad} - (2.00\ \text{rad/s})(2.0\ \text{s})]}{(2.0\ \text{s})^2}$$

$$\boxed{\alpha = 3.5\ \text{rad/s}^2}$$

تطبيق 1 (د)

معادلاتُ الحركةِ الدورانية

1. يتسارعُ دولابُ سيارةٍ-لعبة، تعملُ بالتحكُّمِ عن بُعد، بتعجيل زاويٍّ $22.4\ rad/s^2$. إذا بدأ الدولابُ الدورانَ بسرعةٍ زاويّةٍ $10.8\ rad/s$، فكم تصبحُ سرعتُهُ بعد ثلاثِ دوراتٍ كاملة؟

2. كم يلزمُ الدولابَ من الزمن، في السؤال 1، ليقطعَ ثلاثَ دورات؟

مراجعةُ القسم 1-1

1. حوِّلِ الزاويتَيْن التاليتَيْن من درجاتٍ إلى راديَن:

أ. $35°$

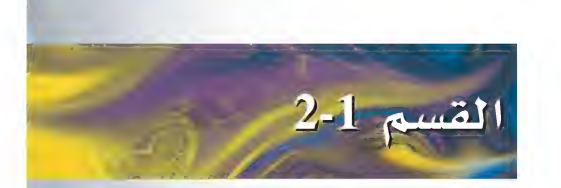
ب. $128°$

2. تحُطُّ بعوضةٌ على مسافةِ $5.0\ cm$ من مركزِ قرصٍ يدورُ في اتجاهِ دورانِ عقاربِ الساعة، فتدورُ البعوضةُ على قوسٍ طولُهُ $5.0\ cm$. ما إزاحةُ البعوضةِ الزاويّة؟

3. يتحرَّكُ راكبُ درّاجةٍ في مسارٍ دائريّ، فيقطعُ نصفَ المسارِ خلال $10.0\ s$. ما سرعتُهُ الزاويّةُ المتوسطة؟

4. **الفيزياءُ في الحياةِ اليومية :** جدِ التعجيلَ الزاويَّ لقرصٍ دوّارٍ في مدينةِ الألعابِ يزيدُ سرعتَهُ الزاويّةَ من $0.50\ rad/s$ إلى $0.60\ rad/s$ خلال $0.50\ s$.

5. **الفيزياءُ في الحياةِ اليومية :** ما السرعةُ الزاويّةُ اللحظيةُ لقرصٍ دوّارٍ في مدينةِ الألعابِ يبدأُ من سرعةٍ زاويّةٍ ابتدائية $0.50\ rad/s$، ويتسارعُ بتعجيل زاويٍّ $0.20\ rad/s^2$ خلال ثانيةٍ واحدة؟



التعجيلُ المماسيُّ والتعجيلُ المركزيُّ
Tangential and Centripetal Acceleration

2-1 أهداف القسم

- يجدُ السرعةَ المماسيةَ لنقطةٍ من جسمٍ صلبٍ، يخضعُ لحركةٍ دورانية، باستعمالِ السرعةِ الزاويّةِ ونصفِ القطر.
- يحلُّ مسائلَ تتضمَّنُ التعجيلَ المماسيَّ.
- يحلُّ مسائلَ تتضمَّنُ التعجيلَ المركزيَّ.

العلاقاتُ بين الكمّياتِ الخطّيّةِ والكمّياتِ الزاويّة

كما رأينا في بدايةِ القسمِ 1-1، يمكنُ وصفُ حركةِ نقطةٍ من جسمٍ، يدورُ حول محورٍ، بطريقةٍ أفضلَ بدلالةِ زاويةِ الدورانِ بدءًا من خطٍّ مرجعٍ معيّن. من المفيد، في بعضِ الأحوالِ، فهمُ العلاقةِ بين السرعةِ الزاويّةِ والتعجيلِ الزاويِّ للنقطةِ من جهة، وبين السرعةِ الخطّيةِ والتعجيلِ الخطّيِ من جهةٍ أخرى.

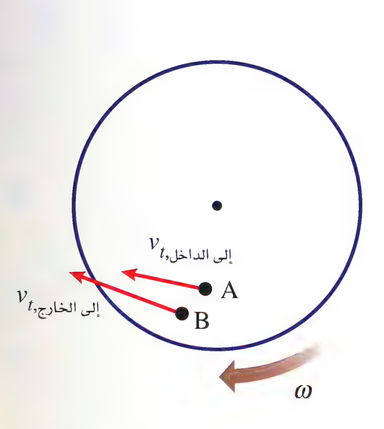
لعلّ أفضلَ طريقةٍ يعتمدُها لاعبُ غولف، لإبعادِ الكرةِ مسافةً طويلة، هي تحريكُ العصا دورانيًّا حول جسمِهِ قبل قذفِ الكرة. إذا كان التعجيلُ الزاويُّ للعصا كبيرًا، يكونُ التعجيلُ الخطّيُّ لرأسِ العصا أثناء دورانِها كبيرًا أيضًا. يؤدّي التعجيلُ الخطّيُّ الكبيرُ هذا إلى قذفِ الكرةِ بسرعةٍ عالية بعد أن تؤثِّرَ فيها بقوّةٍ كبيرة. يعالجُ هذا القسمُ العلاقاتِ بين الكمّياتِ الزاويّةِ والكمّياتِ الخطّية.

السرعةُ المماسية

السرعةُ الخطّيةُ اللحظيةُ لجسمٍ يدورُ في الاتجاهِ المماسيِّ لمسارِهِ الدائري.

السرعةُ المماسيةُ للحركةِ الدائرية

تخيّلْ قُرْصًا دوّارًا في مدينةِ ألعابٍ يدور حول مركزِه. بما أن القُرصَ والجيادَ المثبّتةَ عليه هي عبارةٌ عن جسمٍ صلب، فإن السرعةَ الزاويّةَ والتعجيلَ الزاويَّ لأيِّ جوادينِ على القرصِ هما أنفسُهما في كلِّ لحظة، بغضِّ النظرِ عن بُعدِ الجوادَيْن عن محورِ الدوران. لكن **السرعتينِ المماسيتينِ** tangential speeds للجوادينِ تختلفانِ فيما بينهما إذا كانت المسافتانِ اللتانِ تفصِلُهما عن محورِ الدورانِ مختلفتين. السرعةُ المماسيةُ لأيِّ نقطةٍ تدورُ حول محورٍ هي مقدارُ السرعةِ الخطّيةِ للنقطة. السرعةُ المماسيةُ للجوادِ الذي يدورُ مع القرصِ هي مقدارُ سرعتِهِ في الاتجاهِ المماسيِّ الدائريّ. (تذكرْ أن مماسَّ الدائرةِ هو الخطُّ المستقيمُ الذي يلامسُ محيطَها في نقطةٍ واحدة). يُظهِرُ **الشكل 7-1** السرعةَ المماسيةَ لجوادينِ عند النقطتينِ A و B يقعانِ على مسافتينِ مختلفتينِ من محورِ الدوران.



الشكل 7-1

تدورُ الجيادُ على القرصِ الدوّارِ بالسرعةِ الزاويّةِ نفسِها، لكن بسرعاتٍ مماسيةٍ مختلفة.

لاحظْ أن سرعةَ الجوادِ الموجودِ عند النقطةِ A قد مُثِّلتْ بسهمٍ أقصرَ من السهمِ الذي يمثِّلُ سرعةَ الجوادِ الموجودِ عند النقطةِ B. يوضحُ ذلك اختلافَ السرعتينِ المماسيتينِ للجوادين. كلاهما يقطعُ الإزاحةَ الزاويّةَ نفسَها في المدّةِ نفسِها. لذلك يقطعُ الجوادُ الأبعدُ عن محورِ الدورانِ مسافةً أطول Δs من الجوادِ الأقرب. بناءً على ذلك تكونُ السرعةُ المماسيةُ الأكبرُ للأجسامِ الأبعدِ عن محورِ الدوران، كما في عرباتِ الدولابِ الهوائي، لكي تقطعَ الإزاحةَ الزاويّةَ نفسَها التي للأجسامِ الأقربِ إلى المحور.

كيف تحصلُ على السرعةِ المماسية؟ افترض، في مثالِ القرصِ الدوّار، أن طولَ القوسِ الذي يقطعُهُ أحدُ الجياد Δs في مدّةٍ Δt يدورُ فيها القرصُ بزاوية $\Delta\theta$. تُعطى

الإزاحةُ الزاويَّةُ للجوادِ بمعادلتها.

$$\Delta\theta = \frac{\Delta s}{r}$$

للحصول على السرعةِ الماسيةِ للجواد، اقسِمْ طرفي المعادلةِ على Δt وهي المدَّةُ التي يستغرقُها الجوادُ كي يقطعَ مسافةَ Δs.

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{1}{r}\frac{\Delta s}{\Delta t}$$

من القسم 1-1 عرفتَ أن الطرفَ الأيسرَ من المعادلةِ يعبِّرُ عن ω_{avg}، وأن Δs مسافةٌ خطّية، لذلك تعبِّرُ نسبةُ Δs على Δt عن السرعةِ الماسيةِ على القوس. إذا كانت Δt صغيرةً جدًّا، تكونُ Δs صغيرةً جدًّا بحيث تصبحُ مماسيةً للدائرة. ولذلك تكونُ هذه السرعةُ مماسية.

السرعةُ الماسية

$$v_t = r\omega$$

السرعةُ الماسية = السرعة الزاوية × المسافة بين الجسم ومحور الدوران

لاحظْ أن ω هي السرعةُ الزاويّةُ اللحظيةُ وليستِ السرعةَ الزاويّةَ المتوسطةَ ذلك أن المدَّةَ قصيرةٌ جدًّا. تكونُ هذه العلاقةُ صحيحةً فقط عندما تقاسُ ω بـ rad/s. يجبُ ألا تُستعملَ أيُّ وحداتِ قياسٍ أخرى لـ ω في هذه المعادلة، (deg/s أو rev/s مثلاً).

مثال 1 (هـ)

السرعةُ الماسية

المسألة

يبلغُ نصفُ قُطْرِ قرصِ حاسوب 0.0600 m. إذا كانت السرعةُ الماسيةُ لميكروبٍ يقفُ على حافةِ القرصِ 1.88 m/s، فما سرعةُ القرصِ الزاويّة؟

الحلّ

1. أعرف

المعطى: $r = 0.0600\ \text{m}$ $\quad v_t = 1.88\ \text{m/s}$

المجهول: $\omega = ?$

2. أخطّط

أستعملُ معادلةَ السرعةِ الماسيةِ الواردة في هذه الصفحةِ لحسابِ السرعةِ الزاويّة:

$$v_t = r\omega$$

3. أحسب

$$\omega = \frac{v_t}{r} = \frac{1.88\ m/s}{0.0600\ m}$$

$$\boxed{\omega = 31.3\ \text{rad/s}}$$

تطبيق 1 (هـ)

السرعةُ المماسية

1. املأِ الجدولَ التاليَ بالكمّياتِ المجهولة.

	r	ω	v_t
أ.	0.030 m	121.5 rad/s	?
ب.	0.050 m	?	0.75 m/s
ج.	3.8 m	1.2 rev/s	?
د.	?	1.5π rad/s	2.0π m/s

التعجيلُ المماسيُّ والحركةُ الدائرية

عندما يبدأُ القرصُ الدوّارُ في الحركةِ فإنه يتعرَّضُ لتعجيلٍ زاوي. يكونُ التعجيلُ الخطّيُّ المرتبطُ بالتعجيلِ الزاويِّ مماسيًّا للمسارِ الدائريِّ ويسمّى **التعجيلَ المماسيَّ** tangential acceleration (a_t).

التعجيلُ المماسيُّ

التعجيلُ الخطيُّ اللحظيّ لجسمٍ في الاتجاهِ المماسيِّ للحركةِ الدائريةِ للجسمِ أو المعدَّل الزمني لتغيرِ مقدارِ السرعة اللحظية لجسم في الاتّجاه المماسي لحركته الدائرية.

تخيَّلْ جسمًا يدورُ حول محورٍ ثابتٍ ويغيِّر سرعتَهُ الزاوية بمقدارِ $\Delta\omega$ خلال مدَّةٍ Δt. في نهايةِ المدَّةِ تكونُ سرعةُ الجسم v_t قد تغيَّرتْ بمقدارِ Δv_t. باستعمالِ معادلةِ السرعةِ المماسية، نحصُلُ على:

$$\Delta v_t = r\Delta\omega$$

بالقسمةِ على Δt نحصلُ على: $\frac{\Delta v_t}{\Delta t} = r\frac{\Delta\omega}{\Delta t}$

إذا كانتِ المدَّةُ Δt قصيرةً جدًّا يعبِّر الطرفُ الأيسرُ من المعادلةِ عن التعجيلِ المماسيِّ للنقطة، كما تعبِّر نسبةُ السرعةِ الزاويّةِ إلى الزمن، في الطرفِ الأيمن، عن التعجيلِ الزاويّ. لذلك يكونُ التعجيلُ المماسيُّ كما يلي:

التعجيلُ المماسيُّ

$$a_t = r\alpha$$

التعجيلُ المماسيُّ = التعجيل الزاويّ × المسافة بين الجسم ومحورِ الدوران

ونكرِّرُ القول: إن التعجيلَ الزاويَّ في هذه المعادلةِ يدلُّ على التعجيلِ الزاويِّ اللحظي. يجبُ استعمالُ وحدةِ الراديَن لقياسِ الزوايا في هذه المعادلة، بحيثُ تكونُ وحدةُ قياسِ التعجيلِ الزاويِّ rad/s^2.

مثال 1 (و)

التعجيلُ المماسيُّ

المسألة

يبلغ التعجيلُ الزاويُّ لدوامةٍ في مِهْرَجَانٍ احتفاليّ $0.50\ rad/s^2$. كم يبعدُ راكبٌ عن مركزِ الدوامةِ إذا كان تعجيلُهُ المماسيُّ $3.3\ m/s^2$؟

الحـلّ

1. أعرف

المعطى: $\alpha = 0.50\ rad/s^2$ $\quad a_t = 3.3\ m/s^2$

المجهول: $r = ?$

2. أخطّط

أستعملُ معادلةَ التعجيلِ المماسيِّ، وأعيد ترتيبَها للحصولِ على r.

$$a_t = r\alpha$$

3. أحسب

$$r = \frac{a_t}{\alpha} = \frac{3.3\ m/s^2}{0.50\ rad/s^2}$$

$$\boxed{r = 6.6\ m}$$

تطبيق 1 (و)

التعجيلُ المماسيُّ

1. يتعرَّضُ طفلٌ يقفُ على قرصٍ دوّارٍ لتعجيلٍ خطيٍّ $1.5\ m/s^2$. إذا كان التعجيلُ الزاويُّ للقرْصِ $1.0\ rad/s^2$، فكم يكونُ بُعدُ الطفلِ عن محورِ الدوران؟
2. ما التعجيلُ الزاويُّ لدولابٍ بلغ تعجيلهُ المماسيُّ $9.4 \times 10^{-2}\ m/s^2$ على بعدِ $0.15\ m$ من محورِ الدوران؟



الشكل 8-1

بالرغمِ من سيرِ السيّارةِ بمقدارِ سرعةٍ ثابت 30 km/h، فإنها تتسارعُ لأنّ اتجاهَ سرعتِها يتغير.

التعجيلُ المركزيُّ

Centripetal acceleration

في **الشكل 8-1** سيّارةٌ تتحرَّكُ في مسارٍ دائريٍّ بسرعةٍ مماسيةٍ ثابتة 30 km/h. هذه السيّارةُ تتسارعُ بتعجيلٍ محدَّدٍ باتّجاه المركز، بالرغم من ثباتِ مقدارِ سرعتِها. لمعرفةِ سببِ ذلك افترضْ أن المعادلةَ التي تعرِّفُ التعجيلِ هي:

$$\vec{a} = \frac{\vec{v}_f - \vec{v}_i}{t_f - t_i}$$

لاحظْ أن التعجيلَ ينتجُ من أيِّ تغيُّرٍ يطرأُ على السرعة. ولأن السرعةَ كمّيّةٌ اتجاهيّة، يوجدُ للحصولِ على التعجيلِ طريقتان، إحداهما بتغيُّرِ

مقدارِ السرعةِ والثانيةُ بتغيُّرِ اتجاهِها. السيارةُ التي تتحرَّكُ على دائرةٍ بمقدارِ سرعةٍ ثابتةٍ يكونُ تعجيلُها نتيجةً لتغيُّرِ اتجاهِ السرعة. يُسمّى هذا التعجيلُ **تعجيلاً مركزيًا** centripetal acceleration، ويُعطى مقدارُه بوساطةِ المعادلة:

$$a_c = \frac{v_t^2}{r}$$

في **الشكل 9-1** (أ)، يظهرُ الجسمُ أولاً عند النقطة A بسرعةٍ مماسيةٍ $\vec{v}_i$ عند لحظةٍ زمنية t_i، وبعدَها عند النقطةِ B بسرعةٍ مماسيةٍ $\vec{v}_f$ عند لحظةٍ لاحقةٍ t_f. افترض أن $\vec{v}_i$ و $\vec{v}_f$ تختلفان فقط في الاتجاهِ وأن مقدارَيهِما متساويان.

يمكنُ تحديدُ التغيُّرِ في السرعةِ $\Delta\vec{v} = \vec{v}_f - \vec{v}_i$ بيانيًّا كما في مثلثِ المتجهاتِ في **الشكل 9-1** (ب). لاحظ الآتي: عندما تصبحُ Δt صغيرةً جدًّا (وتقتربُ من الصفر) تصبحُ $\vec{v}_f$ موازيةً لـ $\vec{v}_i$ تقريبًا، ويصبحُ المتَّجهُ $\Delta\vec{v}$ عموديًّا على كل منهما تقريبًا وفي اتجاهِ مركزِ الدائرة. يعني ذلك أن التعجيلَ سيكونُ أيضًا في اتجاهِ مركزِ الدائرة، لأن لها اتجاهَ $\Delta\vec{v}$ نفسَه.

ولأن السرعةَ المماسيةَ تتعلَّقُ بالسرعةِ الزاويّةِ من خلال العلاقة $v_t = r\omega$ يكونُ ممكنًا استعمالُ السرعةِ الزاويّةِ لحسابِ التعجيلِ المركزي أيضًا.

التعجيلُ المركزيُّ

$$a_c = \frac{v_t^2}{r}$$

التعجيلُ المركزيُّ = (السرعة المماسية)^2 / المسافة من محورِ الدوران

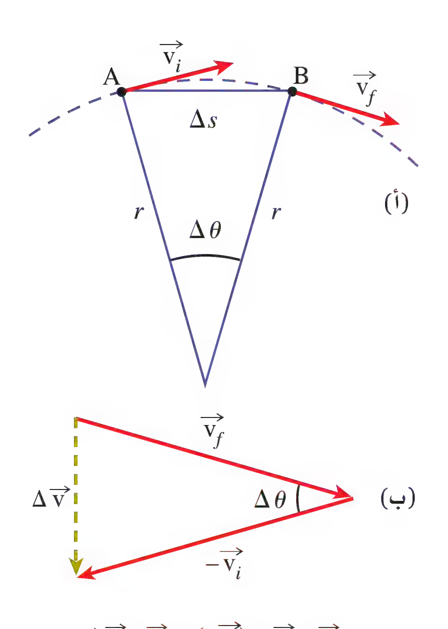
وبما أن $v_t = r\omega$:

$$a_c = r\omega^2$$

التعجيلُ المركزيُّ = المسافة من محورِ الدوران × (السرعة الزاوية)^2

التعجيلُ المركزيُّ

المعدّل الزمنيُّ لتغيُّرِ اتّجاه سرعةِ الجسم عندما يتحرّكُ على مسارٍ دائريّ.



$\Delta\vec{v} = \vec{v}_f + (-\vec{v}_i) = \vec{v}_f - \vec{v}_i$

الشكل 9-1

(أ) عند انتقال الجسم من النقطة A إلى النقطةِ B يتغيّرُ اتجاهُ سرعتِه.

(ب) يُستعملُ جمعُ المتجهاتِ للحصولِ على التغيُّرِ $\Delta\vec{v}$ في سرعةِ الجسم، ويكونُ لحظيًّا في اتجاهِ مركزِ الدائرة.

مثال 1 (ز)

التعجيلُ المركزيُّ

المسألة

تدورُ سيّارةٌ في مسارٍ دائريٍّ بمقدارِ سرعةٍ مماسيةٍ ثابت. إذا كانت السيّارةُ على مسافةِ 48.2 m من مركزِ المسارِ وتعجيلها المركزيُّ $8.05\ m/s^2$، فما سرعتُها المماسية؟

الحـــلّ

1.أعرف

المعطى: $r = 48.2\ m$ $\quad a_c = 8.05\ m/s^2$

المجهول: $v_t = ?$

2.أخطّط

أستعملُ المعادلةَ الأولى للتعجيلِ المركزيِّ، وأعيدُ ترتيبهَا لأحسُب v_t.

$$a_c = \frac{v_t^2}{r}$$

3.أحسب

$$v_t = \sqrt{a_c r} = \sqrt{(8.05\ m/s^2)(48.2\ m)}$$

$$\boxed{v_t = 19.7\ m/s}$$

تطبيق 1 (ز)

التعجيلُ المركزيُّ

1. تدورُ سيارةُ سباقٍ في مسارٍ دائريٍّ بسرعةٍ زاويّةٍ 0.512 rad/s. إذا كان تعجيلُ السيارةِ المركزيُّ 15.4 m/s^2، فما المسافةُ بينها وبين مركزِ المسارِ الدائريّ؟

2. توضَعُ قطعةٌ من الصلصالِ على مسافةِ 0.20 m من مركزِ دولابِ الفخار. إذا كانتِ السرعةُ الزاويّةُ للدولابِ 20.5 rad/s، فما مقدارُ التعجيلِ المركزيِّ لقطعةِ الصلصالِ على الدولاب؟

تعامدُ التعجيلِ المماسيِّ والتعجيلِ المركزيِّ

يختلفُ التعجيلُ المماسيُّ عن التعجيلِ المركزيِّ. لفهمِ اختلافِهما، ننظرُ إلى سيّارةٍ تدورُ في مسارٍ دائري. بما أن مسارَ حركتِها دائريٌّ يكونُ لها دائمًا تعجيلٌ مركزيٌّ نتيجةً للتغيُّرِ المستمرِّ في اتجاهِ سيرِها، وتاليًا في اتجاهِ سرعتِها. إذا ازدادَ مقدارُ تلك السرعةِ المماسيةِ، أو تناقصَ، يكونُ للسيّارةُ أيضًا مركَّبةٌ مماسيةٌ للتعجيل. اختصارًا، إن التعجيلَ المماسيَّ ينتجُ من تغيُّرِ مقدارِ السرعةِ المماسية، بينما ينتجُ التعجيلُ المركزيُّ من تغيُّرِ اتجاهِ تلك السرعة.

الشكل 1-10

يمكنُ إيجادُ اتجاهِ التعجيلِ الكليِّ لجسمٍ في حالةِ دورانٍ باستعمالِ دالّةِ الظلِّ العكسية.

إيجادُ التعجيلِ الكليّ باستعمالِ نظريةِ فيثاغورس

عندما تتوفَّرُ مركّبتا التعجيلِ في الوقتِ نفسِه، يكونُ التعجيلُ المماسيُّ في تماسٍّ مع المسارِ الدائريّ، بينما يكونُ التعجيلُ المركزيُّ في اتجاهِ مركزِ ذلك المسار. ولأن هاتينِ المركّبتينِ متعامدتان، يمكنُنا حسابُ التعجيلِ الكليِّ باستعمالِ نظريةِ فيثاغورس كما يلي:

$$a_{الكليّة} = \sqrt{a_t^2 + a_c^2}$$

يعتمدُ اتجاهُ التعجيلِ الكلّيِّ، كما في **الشكل 1-10**، على مقدارِ كلٍّ من مركَّبَتَيِ التعجيل، ويمكنُ تحديدُ اتّجاهُهُ باستعمالِ دالّةِ الظّلِّ العكسية:

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{a_c}{a_t}\right)$$

مراجعةُ القسم 1-2

1. جدِ السرعةَ المماسيةَ لكرةٍ تدورُ بمقدارِ سرعةٍ زاويّةٍ ثابت 5.0 rad/s على حبلٍ طولُهُ 5.0 m.

2. إذا كان التعجيلُ المماسيُّ لجسمٍ 10.0 m/s^2+، فماذا يحدثُ لسرعتِهِ الزاويّة؟

أ. تتناقص.

ب. تبقى كما هي.

ج. تزداد.

3. **الفيزياءُ في الحياةِ اليومية:** إذا كانتِ السرعةُ الزاويّةُ لقرصٍ دوّارٍ 1.2 rad/s، فما التعجيلُ المركزيُّ لشخصٍ يقفُ على مسافةِ 12 m من مركزِ القرص؟



مسبِّباتُ الحركةِ الدائرية
Causes of Circular Motion

3-1 أهداف القسم

- يحسُبُ القوّةَ التي تحقّقُ الحركةَ الدائريّة.
- يشرحُ كيفيةَ تفسيرِ القصورِ الذاتيِّ لاندفاعِ الأجسامِ إلى الخارجِ في الحركةِ الدائرية.
- يطبّقُ قانونَ نيوتن للجذبِ العامِّ لإيجادِ قوّةِ الجذبِ بين كتلتين.

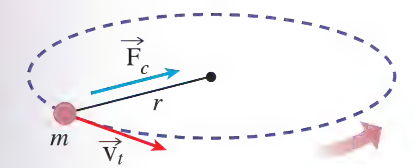
القوَّةُ التي تحقّق الحركةِ الدائرية

ننظرُ إلى كرةٍ مربوطةٍ بطرفِ خيط، وتدورُ على مسارٍ دائريٍّ وأفقيٍّ بمقدارِ سرعةٍ ثابت، كما في **الشكل 11-1**. بما أن اتجاهَ السرعةِ يتغيَّرُ باستمرارٍ أثناءَ الحركة، فإن الكرةَ تتعرَّضُ لتعجيلٍ مركزيٍّ في اتجاهِ مركزِ الحركةِ مقدارُه:

$$a_c = \frac{v_t^2}{r}$$

يحاولُ قصورُ الكرةِ الذاتيُّ أن يحافظَ على سيرِها في خطٍّ مستقيم، إلا أن الخيطَ يمانعُ هذا الميل بتطبيقِه قوّةً على الكرةِ تُخضِعُها للحركةِ في مسارٍ دائريّ، كما في **الشكل 11-1**. يمكنُ، بتطبيقِ القانونِ الثاني لنيوتن، إيجادُ مقدارِ هذه القوّة في الاتجاهِ المركزي:

$$F_c = ma_c$$



الشكل 11-1
تدورُ الكرةُ في دائرةٍ نتيجةَ لقوّةٍ مركزيةٍ تشدُّها في اتجاهِ مركزِ الدائرة.

محصّلةُ القوى على الجسمِ المتجهةُ نحو مركزِ المسارِ الدائريِّ هي التي تحقّقُ الحركةَ الدائرية للجسم ويسمى **القوة المركزيّة** Central force F_c.

القوة المركزيّة

هي محصلة القوى المؤثّرة في جسم يتحرّك على مسار دائري والتي تتجه نحو مركز المسار.

القوّةُ التي تحقّقُ الحركةَ الدائرية

$$F_c = m\frac{v_t^2}{r}$$

القوّةُ التي تحقّقُ الحركةَ الدائرية = الكتلة × $\frac{\text{(السرعة المماسية)}^2}{\text{المسافة بين الجسم ومحور الدوران}}$

$$F_c = mr\omega^2$$

القوّةُ التي تحقّقُ الحركةَ الدائرية = الكتلة × المسافة إلى محور × (السرعة الزاوية)^2

تقاسُ القوّةُ التي تحقّقُ الحركةَ الدائريةَ في النظامِ الدوليِّ للوحدات بالنيوتن (N). وهي لا تختلفُ عن أيِّ قوّةٍ تمّتْ دراستُها من قبل. فمثلاً، تؤمِّن قوّةُ الاحتكاكِ بين عجلاتِ سيارةِ السباقِ والأرضِ القوّةَ المركزيةَ اللازمةَ لتمكينِ السيارةِ من متابعةِ حركتِها الدائرية، كما تؤمِّنُ قوّةُ الجذبِ بين الأرضِ والقمرِ القوّةَ المركزيةَ اللازمةَ لإبقاءِ القمرِ في مدارِه حول الأرض.

مثال 1 (ح)

القوَّةُ التي تحقّقُ الحركةَ الدائرية

المسألة

يطيرُ قبطانٌ في طائرةٍ بسرعةٍ مماسيةٍ مقدارُها 30.0 m/s في مسارٍ دائريٍّ نصفُ قطرِه 100.0 m. إذا احتجنا إلى قوّةٍ مقدارُها 635 N لإبقاءِ القبطانِ في مسارِه الدائريّ، فكم تكونُ كتلةُ القبطان؟

الحـلّ

المعطى: $v_t = 30.0\ \text{m/s}$ $\quad r = 100.0\ \text{m}$ $\quad F_c = 635\ \text{N}$

المجهول: $m = ?$

أستعملُ معادلةَ القوة، وأعيدُ ترتيبَها لحسابِ m.

$$F_c = m\frac{v_t^2}{r}$$

$$m = F_c\frac{r}{v_t^2} = 635\ \text{N} \times \frac{100.0\ \text{m}}{(30.0\ \text{m/s})^2}$$

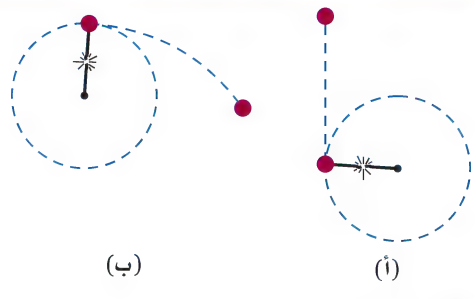
$$\boxed{m = 70.6\ \text{kg}}$$

تطبيق 1 (ح)

القوَّةُ التي تحقّقُ الحركةَ الدائرية

1. تجلسُ طفلةٌ على دولابٍ مربوطٍ بفرعِ شجرةٍ بحبلٍ طولهُ 2.10 m. يدفعُ الوالدُ ابنتَهُ بسرعةٍ مماسيةٍ مقدارُها 2.50 m/s. إذا كان مقدارُ القوةِ اللازمةِ التي تحقّقُ للطفلةِ حركتَها الدائرية 88.0 N، فكم تكونُ كتلتُها؟

2. تدورُ سيّارةٌ كتلتُها 905 kg في مسارٍ دائريٍّ محيطه 3.25 km. ما السرعةُ المماسيةُ (الخطّية) للسيّارةِ إذا كانَ مقدارُ القوةِ اللازمةِ لتحقيقِ حركتِها الدائرية 2140 N؟



الشكل 12-1

تدورُ كرةٌ مربوطةٌ بطرفِ خيطٍ في دائرةٍ رأسية. عندما ينقطعُ الخيطُ في الموقع (أ) تتابعُ الكرةُ حركتَها رأسيًّا إلى أقصى ارتفاع، ثم تتابعُ حركتَها في حالةِ سقوطٍ حرّ. لكن إذا انقطعَ الخيطُ في الموقع (ب)، عند أعلى الدائرة، فإن الكرةَ تتابعُ سيرَها على قطعٍ مكافئ.

القوةُ المركزيةُ والحركةُ الدائرية

القوَّةُ المطلوبةُ لتحقيقِ الحركةِ الدائريةِ تكونُ عموديةً على اتجاهِ الحركة، لذلك تغيِّرُ القوَّةُ اتجاهَ سرعةِ هذه الحركةِ باستمرار. وإذا اختفتْ هذه القوّةُ وتوقّفتْ عن التأثير، فإنّ الجسمَ لن يتمكّنَ من متابعةِ حركتِهِ الدائرية، بل يتابعُ سيرَهُ في خطٍّ مستقيمٍ مماسٍّ للدائرة. لملاحظةِ ذلك، انظرْ إلى كرةٍ مربوطةٍ بطرفِ خيطٍ وتدورُ في دائرةٍ رأسية، كما في **الشكل 12-1**. إذا انقطعَ الخيطُ في اللحظةِ التي تكونُ فيها الكرةُ عند الموقع الذي يظهر في **الشكل 12-1** (أ)، فإن القوَّةَ التي تحقّقُ الحركةَ الدائريةَ تتوقَّفُ عن التأثير، فتتابعُ الكرةُ سيرَها في الاتجاهِ الرأسيِّ إلى أقصى ارتفاع. إنها تتابعُ حركتَها كجسمٍ

ساقطٍ تحت تأثيرِ الجاذبية. لكن إذا انقطعَ الخيطُ عندما تكونُ الكرةُ في أعلى الدائرة، كما في **الشكل 1-12** (ب)، فإنها تنطلقُ في الاتجاهِ الأفقيِّ المماسِّ للدائرة، وتتابعُ، من ثمَّ، سيرها على القطعِ المكافئِ لحركةِ مقذوف.

الحركةُ الدورانيةُ لجسم

لكي نفهمَ الحركةَ الدورانيةَ للأجسامِ، نفترضُ أن سيّارةً دخلتْ بسرعةٍ كبيرةٍ في منعطفٍ دائريٍّ إلى اليسار. عندما ينحرفُ السائقُ بسرعةٍ إلى اليسار، يندفعُ الراكبُ إلى اليمينِ نحوَ بابِ السيّارة. يمنعُ بابُ السيّارةِ الراكبَ من الاندفاعِ إلى الخارج. ما الذي يدفعُ الراكبَ أساسًا في اتجاهِ الباب؟ أحدُ الأجوبةِ الشائعةِ عن هذا السؤالِ هو أن من الضروريِّ أن تكونَ هناك قوّةٌ قادرةٌ على دفعِ الراكبِ إلى الخارج. هذه القوّةُ تُسمّى خطأً قوّةَ الطردِ المركزية.

إن التفسيرَ الصحيحَ لهذه الظاهرةِ هو كما يلي: قبل دخولِ السيّارةِ في المسارِ الدائريّ، كانَ الراكبُ في داخِلها يتحرَّكُ في خطٍّ مستقيم. عند دخولِ السيارةِ في مسارٍ مائلٍ يحاولُ الراكبُ، نتيجةً لقصورِهِ الذاتيِّ، متابعةَ سيرِهِ في المسارِ المستقيمِ الأساسي. يتطابقُ هذا التفسيرُ مع القانونِ الأولِ لنيوتن الذي يفيدُ بأن الميلَ الطبيعيَّ للجسمِ المتحرّكِ هو أن يتابعَ سيرَهُ في خطٍّ مستقيمٍ وبسرعةٍ ثابتة، ما يؤدي إلى خلطٍ بين القصورِ الذاتيِّ وما يُسمّى قوّةَ الطردِ المركزية. إذا توفّرتْ قوّةٌ مركزيةٌ كافيةٌ لتحقيقِ الحركةِ الدائريةِ للراكبِ فإنه يتابعُ حركتَهُ الدائريةَ مع السيارة. تتوفَّرُ هذه القوّةُ، التي تحقّقُ الحركةَ الدائريةَ للراكب، من الاحتكاكِ الحاصلِ بين السائقِ ومقعدِ السيارة. إذا كانت قوّةُ الاحتكاكِ هذه غيرَ كافيةٍ، فإن الراكبَ ينزلقُ عن المقعدِ عند انحرافِ السيارة. يتمُّ ذلك نتيجةً للقصورِ الذاتيِّ للراكبِ الذي يدفعُهُ إلى متابعةِ سيرِهِ في مسارٍ مستقيم. يتابعُ الراكبُ انزلاقَهُ إلى أن يصطدمَ بالبابِ الذي يؤمّنُ له القوّةَ المركزيةَ الكافيةَ التي تمكّنُهُ من متابعةِ الحركةِ الدائريةِ مع السيّارة. لا ينزلقُ الراكبُ في اتجاهِ البابِ بقوّةِ طردٍ خفيّة، بل نتيجةً لعدمِ وجودِ القوّةِ المركزيةِ اللازمةِ لتحريكِهِ مع السيّارة.

قانونُ نيوتن للجذبِ العامّ

أنت تعلمُ أن الكواكبَ تدورُ حول الشمسِ في مداراتٍ شبهِ دائرية. وكما ذكرنا سابقًا، فإن القوّةَ التي تمنعُ تلك الكواكبَ من متابعةِ مساراتٍ مستقيمةٍ هي **قوةُ الجاذبية gravitational force**. إن قوّةَ الجاذبيةِ قوّةٌ مجاليةٌ بين أيِّ جسمين، بغضِّ النظرِ عن الوسطِ الذي يفصِلُ بينهما. تنشأُ هذه القوّةُ ليس فقط بين الأجسامِ ذاتِ الكتلِ الكبيرةِ، كالشمسِ والأرضِ والقمر، بل بين أيِّ جسمينِ مهما يكنْ حجمُهما أو تركيبُهُما. هناك مثلاً قوّةُ جذبٍ مشتركةٍ بين مقعدَيْنِ في غرفةِ الصفّ، إلا أن مقدارَها صغيرٌ جدًّا قياسًا على قوّة الجذبِ بين القمرِ والأرض. **قوّةُ الجذبِ تتناسبُ طردًا مع حاصلِ ضربِ كتلتَي الجسمَيْن.**

قوّةُ الجاذبية

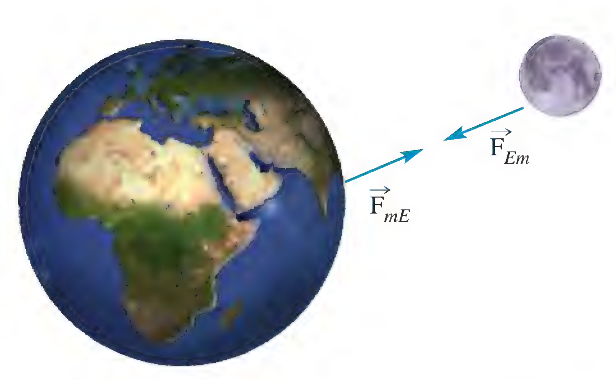
قوّةُ التجاذبِ المتبادلِ بين أيِّ جسيمَيْن.

الفيزياءُ والحياة

1. البيزا Pizza: من أجلِ صنعِ رقاقةِ البيزا، يرمي صانعو البيزا عجينتَها في الهواءِ بعد غزلِها بقوّة. لماذا يؤدّي ذلك إلى اتساعِ رقاقةِ العجين هذه؟

2. الأرجوحةُ الدائرية: في الرسمِ التالي تغزلُ الأرجوحةُ الدائريةُ ركّابَها الجالسينَ في مقاعدَ مربوطةٍ إلى أعلى بحبالٍ رأسية. لماذا تنحرفُ الأرجوحةُ وتبتعدُ عن المركزِ عندما يبدأُ عمودُ الأرجوحةِ بالدوران؟





الشكل 13-1
قوَّةُ التفاعلِ بين الأرضِ والقمرِ هي قوَّةٌ جذبية، وفقًا للقانونِ الثالثِ لنيوتن: $\vec{F}_{Em} = - \vec{F}_{mE}$.

تشدُّ قوَّةُ الجاذبيةِ الجسمينِ الواحدَ في اتجاهِ الآخر. يوضّحُ **الشكل 13-1** التفاعلَ القائمَ بين الأرضِ والقمر، حيث تكونُ قوَّةُ التفاعلِ جذبية. نذكِّرُ بأن القانونَ الثالثَ لنيوتن ينصُّ على أن القوَّةَ التي تؤثِّرُ بها الأرضُ في القمرِ هي $\vec{F}_{Em}$، وهي تتساوى في المقدارِ وتتعاكسُ في الاتجاهِ مع القوَّةِ $\vec{F}_{mE}$ التي يؤثِّرُ بها القمرُ في الأرض.

اعتمادُ قوَّةِ الجذبِ على المسافةِ بين الكتل

إذا كانتِ المسافةُ بين مركزَيْ كتلتين m_1 و m_2 هي r، يكونُ مقدارُ قوَّةِ الجذبِ بينهما وفقًا للمعادلةِ التالية:

قانونُ نيوتن للجذبِ العامّ

$$F_g = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$$

قوةُ الجاذبية = ثابت الجذب العام × $\frac{\text{الكتلة 1} \times \text{الكتلة 2}}{(\text{المسافة بين مركزي الكتلتين})^2}$

G هو ثابتٌ يسمّى ثابتَ الجذبِ العامّ، ويمكنُ استعمالهُ لحسابِ قوَّةِ الجاذبيةِ بين أي كتلتين. والقيمةُ المختبريةُ لهذا الثابتِ هي:

$$G = 6.673 \times 10^{-11}\ \frac{\text{N•m}^2}{\text{kg}^2}$$

يُعتبَرُ قانونُ الجاذبيةِ العامُّ أحدَ أمثلةِ قانون التربيع العكسي، وذلك لأن القوَّةَ تتناسبُ طردًا مع مقلوبِ مربّعِ المسافةِ الفاصلة. يعني ذلك أن قوَّةَ الجذبِ بين الكتلتين تتناقصُ تبعًا لمربّعِ المسافةِ بين مركزَيْهما.

تأثيرُ قوَّةِ الجاذبيةِ عند مركزِ الكتلةِ الكروية

تؤثرُ كتلةٌ كرويةٌ في جسيمٍ يقعُ خارجَها بقوَّةٍ جاذبيةٍ مشابهةٍ للقوَّةِ التي يؤثِّرُ بها جسيمٌ يقعُ عند مركز تلك الكرةِ وله كاملُ كتلتِها. فمثلاً، القوَّةُ التي تؤثرُ بها الكرةُ الأرضيةُ في جسمٍ كتلتُه m موجودٍ على سطحِ الأرض لها هذا المقدار:

$$F_g = G\frac{M_E\, m}{R_E^{\,2}}$$

حيث M_E كتلةُ الكرةِ الأرضية و R_E نصفُ قطرِها، ويكونُ اتجاهُ هذه القوّة نحو مركزِ الأرض. لاحظْ أن هذه القوَّةَ هي في الحقيقةِ وزنُ تلك الكتلةِ أي mg ومقدارُها:

$$mg = G\frac{M_E\, m}{R_E^{\,2}}$$

يمكنُنا، بتعويضِ القيمِ الحقيقيةِ لكتلةِ الأرض ونصفِ قطرِها، إيجادُ قيمةِ g ومقارنتُها بتعجيلِ السقوطِ الحرِّ المستعملِ في هذا الكتاب.

هل تعلم؟

يفيدُ اقتراحُ الفلكيِّ كبلر أن الكواكبَ التي حول الشمسِ تدورُ في مساراتٍ إهليليجية. ومع ذلك فإن بعضَ العلماءِ قد ظلّوا يعتقدونَ أن الأرضَ هي مركزُ المجموعةِ الشمسية، إلى أن أثبتَ إسحقُ نيوتن أن من الممكنِ التنبؤَ بالمساراتِ الإهليليجيةِ باستعمالِ قوانين الحركة.

يمكنُنا اختصارُ m من طرفَي المعادلة، فنحصلُ على:

$$g = G\frac{M_E}{R_E^2} = \left(6.673 \times 10^{-11}\ \frac{N\cdot m^2}{kg^2}\right)\frac{5.98 \times 10^{24}\ kg}{(6.37 \times 10^6\ m)^2} = 9.83\ m/s^2$$

وهذهِ قيمةٌ قريبةٌ من القيمةِ المستعملةِ في هذا الكتاب. الفرقُ بينهما ناتجٌ عن تدويرِ قيمتَيّ كتلةِ الأرضِ ونصفِ قطرِها.

مثال 1 (ط)

قوّةُ الجاذبية

المسألة

جدِ المسافةَ بين مركزَيْ كرتَيْ بليارد، كتلةُ الأولى 0.300 kg وكتلةُ الثانية 0.400 kg ومقدارُ قوّةِ الجذبِ بينهما 8.92×10^{-11} N.

الحـلّ

1. أعرف

المعطى: $m_1 = 0.300$ kg $m_2 = 0.400$ kg $F_g = 8.92 \times 10^{-11}$ N

المجهول: $r = ?$

2. أخطّط

أستعملُ معادلةَ قانون نيوتن للجذبِ العامّ: $F_g = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$

أعيدُ ترتيب المعادلة لإيجاد r:

$$r^2 = \frac{G}{F_g}m_1 m_2$$

3. أحسب

$$r^2 = \frac{6.673 \times 10^{-11}\ \frac{N\cdot m^2}{kg^2}}{8.92 \times 10^{-11}\ N}(0.300\ kg)(0.400\ kg) = 8.97 \times 10^{-2}\ m^2$$

$$\boxed{r = \sqrt{8.97 \times 10^{-2}\ m^2} = 3.00 \times 10^{-1}\ m}$$

تطبيق 1 (ط)

قوّةُ الجاذبية

1. إذا كانت كتلةُ كلٍّ من الكرتين في المثال 1 (ط) 0.800 kg، فكم يجبُ أن تكونَ المسافةُ بين مركزي الكرتين، بحيثُ يبقى مقدارُ قوّةِ الجذبِ بينهما كما في المثال 1 (ط)؟ كيف تؤثِّرُ الكتلةُ في مقدارِ قوّةِ الجذبِ؟
2. جِدْ مقدارَ قوى الجاذبيةِ التي تؤثِّرُ في شخصٍ كتلتُهُ 67.5 kg لدى وقوفِهِ على سطحِ كلٍّ من الكواكبِ التالية:

	الكوكب	m	r
أ.	الأرض	5.98×10^{24} kg	6.37×10^6 m
ب.	المرّيخ	6.34×10^{23} kg	3.43×10^6 m

مراجعةُ القسم 1-3

1. تتحرَّكُ عربةٌ متزحلقةٌ داخل حلقةٍ رأسيةٍ بمقدارِ سرعةٍ ثابت، حيث يصبحُ راكبُ العربةِ رأسًا على عَقِبٍ عند أعلى نقطة. ما اتجاهُ القوَّةِ التي تمكِّنُ العربةَ والراكبَ من الدورانِ في دائرة؟ ما مسبِّبُ هذه القوَّة؟

2. حدِّدِ القوَّةَ التي تحقِّقُ الحركةَ الدائريةَ فيما يلي:

أ. راكبُ دراجةٍ يسيرُ في مسارٍ دائريٍّ مسطّح.

ب. دراجةٌ تسيرُ في مسارٍ دائريٍّ مسطّح.

ج. زلاّجةٌ تنحرِفُ عند زاويةِ مسار.

3. **الفيزياءُ في الحياةِ اليومية:** يجلسُ شخصٌ كتلتُهُ 90.0 kg في دُوّامةٍ في مدينةِ ألعابٍ تدورُ بسرعةٍ زاويّةٍ 1.15 rad/s. إذا كانَ نصفُ قطرِ الدوّامةِ 11.5 m، فما مقدارُ القوَّةِ التي تحقِّقُ الحركةَ الدائريةَ للراكب؟

ملخَّصُ الفصل 1

أفكارٌ أساسية

القسمُ 1-1 قياسُ الحركةِ الدورانية

- تُعرَّفُ السرعةُ الزاويّةُ المتوسّطة ω_{avg} لجسمٍ صلبٍ دوّارٍ بأنها نسبةُ الإزاحةِ الزاويّةِ $\Delta\theta$ إلى الفترةِ الزمنيةِ Δt.
- يُعرَفُ متوسّطُ التعجيلِ الزاويِّ α_{avg} لجسمٍ صلبٍ دوّارٍ بأنه نسبةُ التغيُّرِ في السرعةِ الزاويةِ $\Delta\omega$ إلى الفترةِ الزمنيةِ Δt.

القسمُ 2-1 التعجيلُ المماسيُّ والتعجيلُ المركزيُّ

- يكونُ لنقطةٍ في جسمٍ صلبٍ يدورُ حولَ محورٍ سرعةٌ مماسيةٌ تتعلَّقُ بالسرعةِ الزاويَّةِ للجسم. فإذا تغيَّرتِ السرعةُ الزاويةُ للجسمِ تتغيَّرُ السرعةُ المماسيةُ لأيِّ نقطةٍ منه.
- تتحقَّقُ الحركةُ الدائريةُ المنتظمةُ في حالةِ التعجيلِ ذي المقدارِ الثابتِ والمتعامدِ مع السرعةِ المماسية.

القسمُ 3-1 مسبِّباتُ الحركةِ الدائرية

- القوّةُ المؤثّرةُ في جسمٍ يدورُ بحركةٍ دائريةٍ منتظمةٍ تكونُ موجَّهةً دائمًا نحو مركزِ الدائرة.
- يوجدُ بين أيِّ جسمين في الكونِ قوّةُ تجاذبٍ تتناسبُ طردًا مع حاصلِ ضربِ كتلتيهما وكذلك مع مقلوبِ مربّعِ المسافةِ بينهما.

رموزُ المتغيِّرات

الكمية	الوحدة
s طولُ القوس	m
$\Delta\theta$ الإزاحةُ الزاويّة	rad
ω السرعةُ الزاويّة	rad/s
α التعجيلُ الزاوي	rad/s^2
v_t السرعةُ المماسية	m/s
a_t التعجيلُ المماسيّ	m/s^2
a_c التعجيلُ المركزيّ	m/s^2
F_c القوّةُ المركزية	N
G ثابتُ الجاذبيةِ العامّ	$\frac{N \cdot m^2}{kg^2}$

مصطلحاتٌ أساسية

الحركةُ الدورانية
(ص 4) Rotational motion

الراديَن (ص 5) Radian

الإزاحةُ الزاويّة
(ص 6) Angular displacement

السرعةُ الزاويّة
(ص 7) Angular speed

التعجيلُ الزاويّ
(ص 9) Angular acceleration

السرعةُ المماسية
(ص 13) Tangential speed

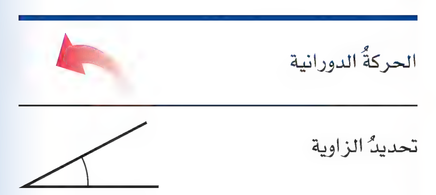
التعجيلُ المماسيُّ
(ص 15) Tangential acceleration

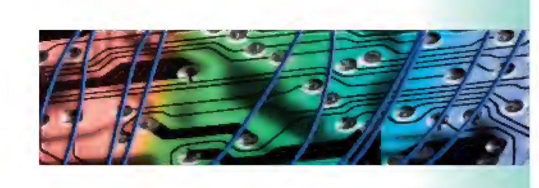
التعجيلُ المركزيُّ
(ص 17) Centripetal acceleration

القوة المركزية
(ص 19) Central force

قوّةُ الجاذبية
(ص 21) Gravitational force

رموزُ المخططات





مراجعةُ الفصل 1

راجعْ وقيِّمْ

قياسُ الحركة الدّورانية

أسئلةُ مراجعة

1. ما مقدارُ π rad بالدرجات؟ وما عددُ دوراتِها؟
2. ميِّزْ بين السرعةِ الخطّيةِ والسرعةِ الزاويّة.
3. هل يكونُ لجميعِ نِقاطِ الدولابِ السرعةُ الزاويّةُ نفسُها عند دورانِهِ حول محورٍ ثابت؟

مسائلُ تطبيقية

4. تقطعُ مركبةٌ في دولابٍ هوائيٍّ إزاحةً زاويّةً 0.34 rad على قوسٍ طولُهُ 12 m. ما نصفُ قطرِ الدولاب؟
5. تقطعُ نقطةٌ على محيطِ دولابٍ قوسًا طولُه 2.5 m عندما يدورُ الدولابُ بزاويةِ $35°$. إذا دار الدولابُ بزاويةِ 35 rad وقطعَ بعدها 35 دورة، تقطعُ النقطةُ نفسُها قوسينِ طولاهما 143 m و 9.0×10^2 m على التوالي. ما نصفُ قطرِ الدولاب؟
6. ما المدَّةُ اللازمةُ لعقربِ الثواني في الساعةِ ليدورَ بزاويةِ 4.00 rad؟
7. يدورُ مثقابٌ كهربائيٌّ من السكونِ بتعجيل زاويّ ثابت، وتصلُ سرعتُهُ الزاويّةُ إلى 2628 rad/s خلال 3.20 s.
   أ. جدِ التعجيلَ الزاويَّ الثابتَ للمثقاب.
   ب. جِدْ زاوية دوران المثقابِ خلال هذه المدة.

التعجيل المماسيُّ والتعجيلُ المركزيّ

أسئلةُ مراجعة

8. هل يكونُ لجميعِ نِقاط دولابٍ سرعةٌ مماسيةٌ واحدة، عند دورانِ الدولابِ حول محورٍ ثابت؟
9. صحِّحِ النصَّ التالي: تدخلُ سيارةٌ دوّارًا بسرعةٍ ثابتةٍ 145 km/h.
10. صفْ مسارَ جسمٍ متحرِّكٍ مقدارُ تعجيلِه ثابتٌ واتجاهُه متعامدٌ مع سرعتِه.
11. يتحرَّكُ جسمٌ في مسارٍ دائريٍّ بسرعةٍ مقدارُها v ثابت.
    أ. هل سرعةُ الجسمِ ثابتة؟ اشرحْ.
    ب. هل تعجيلهُ ثابت؟ اشرحْ.

أسئلةٌ حول المفاهيم

12. أعطِ مثالاً على موقفٍ يكونُ فيه لسيارةٍ متحرِّكةٍ تعجيلٌ مركزيٌّ ولا يكونُ لها تعجيلٌ مماسي.
13. هل يمكنُ لسيارةٍ أن تسيرَ على مسارٍ دائريٍّ بحيث يكونُ لها تعجيلٌ مماسيٌّ ولا يكونُ لها تعجيلٌ مركزيّ؟
14. تُستعملُ دعستا الوقودِ والفرامل لتُغيِّرَ سُرعةَ السيّارةِ من خلالِ تسارعِ السيارةِ وتباطئِها على التوالي. هل يستطيعُ مقودُ السيارةِ القيامَ بهذا العمل؟ اشرحْ ذلك.

مسائلُ تطبيقية

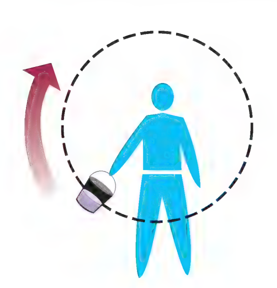
15. انطلقتْ حصاةٌ من فرزةٍ في دولابِ سيارةٍ نصفُ قطرِهِ 32 cm. إذا كان مقدارُ السرعةِ المماسيةِ للحصاةِ 49 m/s، فما السرعةُ الزاويَّةُ للدولاب؟
16. يغزلُ أحدُهم مجموعةَ مفاتيحَ معلَّقةٍ بسلسلة. إذا كان التعجيلُ المركزيُّ للمفاتيح $145\ m/s^2$ وطولُ السلسلةِ 0.34 m، فكم تكونُ السرعةُ المماسيةُ للمفاتيح؟

مسبّباتُ الحركةِ الدائرية

أسئلةُ مراجعة

17. تخيَّلْ أنك تربطُ جسمًا ثقيلاً بطرفِ نابض وتحرِّكُهُ في دائرةٍ أفقية، وأنت تُمسِكُ بالطرفِ الثاني للنابض. هل يستطيلُ النابض؟ اشرحْ إجابتَك بدلالةِ القوّةِ التي تسبِّبُ الحركةَ الدائرية.

18. لماذا لا تسقطُ المياهُ من قعرِ دلوٍ تدورُ في دائرةٍ رأسية وبسرعة كافية، كما في **الشكل 1-14**؟



الشكل 1-14

19. اشرحِ الفرقَ بين التعجيلِ المركزيِّ والتعجيلِ الزاويِّ.

20. علّقْ على النصِّ التالي: «لا توجدُ جاذبيةٌ في الفضاءِ البعيد».

أسئلةٌ حول المفاهيم

21. لماذا لا تكونُ الأرضُ كرويةً بشكلٍ تامٍّ؟ ولماذا تنتفخُ عند خطِّ الاستواء؟ اشرحْ ذلك.

22. نتيجةً لدورانِ الأرض، أيكونُ وزنُكَ أكبرَ عند خطِّ الاستواءِ أم عند القطبين؟ لماذا؟

23. لماذا يتطايرُ الطينُ العالقُ بحافةِ إطارات السيارة التي تدورُ بسرعةٍ عالية؟

24. لا يكونُ روّادُ الفضاءِ العائمونَ في مركبةٍ فضائيةٍ في مجالِ جاذبيةٍ صفريّ. لماذا يبدو الروّادُ مع ذلك عديمِي الوزن؟

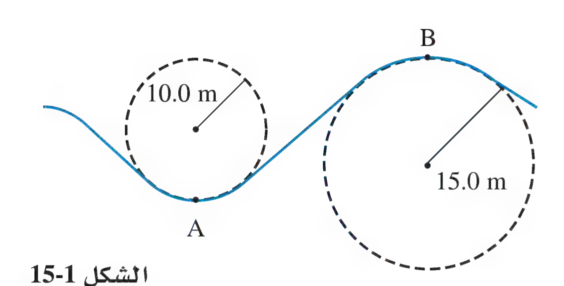
25. تحرّكُ فتاةٌ كرةً مربوطةً بطرفِ خيطٍ في دائرةٍ رأسية. هل تكونُ قوّةُ شدِّ الخيطِ أكبرَ من وزنِ الكرةِ عند أدنى نقطةٍ من مسارِ الكرة؟

مسائلُ تطبيقية

26. تنزلقُ سيّارةٌ-لعبةٌ على منحدرٍ نحو النقطة A، ثم ترتفعُ إلى القمّةِ B كما في **الشكل 1-15**. يكونُ مقدارُ سرعةِ السيارةِ عند النقطةِ A ‏20.0 m/s، في حين محصلة القوى على السيارة نحو المركز هي 2.06×10^4 N.

أ. ما كتلةُ السيارة؟

ب. ما أقصى سرعةٍ يمكنُ أن تحقّقَها السيارةُ عند B بحيثُ تبقى على مسارِها تحت تأثيرِ الجاذبية فقط؟



الشكل 1-15

مراجعةٌ عامّة

27. تدورُ الأرضُ حولَ الشمسِ مرّةً كل 365.25 يومًا. جدِ السرعةَ الزاويّةَ المتوسّطةَ لدورانِها بوحدةِ rad/s.

28. يبدأُ حوضُ غسّالةٍ كهربائيةٍ دورانَهُ من السكون، ويصلُ إلى سرعةٍ زاويّةٍ 11π rad/s خلال 8.0 s. عندها تُفتَحُ الغسّالةُ وتُفصَلُ الطاقةُ عنها بتوقُّفِ مفتاحِ الأمان، فتتباطأُ سرعةُ دورانِ الحوضِ إلى أن يقفَ تمامًا بعد 12.0 s. ما عددُ الدوراتِ التي أكملَها الحوضُ في كلٍّ من فترتَيِ التشغيلِ والتوقُّف، مع الافتراض أن التعجيلَ الزاويَ ثابت؟

29. تحلّقُ طائرةٌ في مسارٍ دائريٍّ أفقيّ، بسرعةٍ مقدارُها 105 m/s. لا يريدُ القبطانُ الذي كتلتُهُ 80.0 kg أن يتجاوزَ التعجيلُ المركزي سبعةَ أمثالِ تعجيلِ السقوطِ الحرّ.

أ. جدْ أقلَّ قيمةٍ ممكنةٍ لنصفِ قطرِ مسارِ الطائرة.

ب. مع هذه القيمةِ لنصفِ القطر، ما محصّلةُ القوى التي تحقّقُ الحركةَ الدائريةَ للقبطان، والمحصّلةُ التي تطبّقُها قوّةُ الاحتكاكِ بالمقعدِ وحزامُ الأمان؟

30. تتعرّضُ سيارةٌ تسيرُ بسرعةِ 30.0 m/s لتعجيلٍ سالبٍ مقدارُه $2.00\ m/s^2$ عند تطبيقِ المكابح. كم دورةً يدورُ كلُّ دولابٍ قبل أن تتوقّفَ السيارةُ نهائيًّا؟ افترضْ أن الإطاراتِ لا تنزلقُ وأن نصفَ قطرِ كلٍّ منها 0.300 m.

31. رُميَتْ قطعة نقودٌ معدنيةٌ قطرُها 2.40 cm على مسارٍ أفقيّ، وبدأتْ تتدحرجُ بلا انزلاقٍ بدءًا من سرعةٍ زاويّةٍ 18.0 rad/s. إذا تباطأتْ بتعجيلٍ زاويٍّ مقدارُه $1.90\ rad/s^2$، فما مسافةُ تدحرُجِها قبل أن تتوقّف؟

.32 كتلةٌ مربوطةٌ بخيطٍ طولُه 50.0 cm تدورُ بدءًا من السكونِ في مسارٍ دائريّ، فتقطعُ 40 دورةً كاملةً خلال 1.00 min قبل أن تصلَ إلى سرعتِها الزاويّة النهائية. ما سرعتُها الزاويّةُ بعد انقضاءِ 1.00 min؟

.33 سيارةٌ وزنُها 13500 N تسيرُ بسرعةٍ مقدارُها 50.0 km/h في مسارٍ دائريّ نصفُ قطرِه 2.00×10^2 m. جِدْ ما يلي:

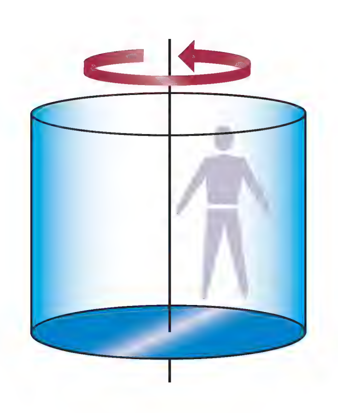
أ. التعجيل المركزي للسيّارة.

ب. أقلَّ قيمةٍ لمعامل الاحتكاكِ السكونيّ بين الإطاراتِ والأرض تمكنُ السيارةَ من الالتفافِ في المسارِ الدائريِّ بأمان.

.34 تسيرُ سيارةٌ كتلتُها 2.00×10^3 kg في مسارٍ دائريٍّ نصفُ قطرِه 20.0 m. إذا كانت الطريقُ مستويةً ومعاملُ الاحتكاكِ السكونيِّ بين الإطاراتِ وبينها 0.70، فما أقصى سرعةٍ يمكنُ للسيارةِ أن تحققَها دون أن تنزلق؟

.35 يوضعُ قالبٌ من النحاسِ على مسافةِ 30.0 cm من مركزِ طاولةٍ فولاذٍ دوّارة. يبلُغُ معاملُ الاحتكاكِ السكونيِّ بين القالبِ والطاولة 0.53. تبدأُ الطاولةُ من السكونِ وتدورُ بتعجيلٍ زاويّ ثابت، مقدارُه $0.50\ rad/s^2$. ما المدةُ التي يبدأُ بعدها القالبُ في الانزلاقِ على الطاولة؟ (ملاحظة: مقدارُ القوةِ المتعامدةِ في هذه الحالةِ يساوي مقدارَ وزنِ القالب.)

.36 في مدينةِ ألعابٍ تدورُ أسطوانةٌ كبيرةٌ نصفُ قطرِها 3.00 m بسرعةٍ زاويّةٍ مقدارُها 5.00 rad/s، كما في **الشكل 1-16**. يلتصقُ اللاعبونَ عندها بالجدارِ الداخليِّ للأسطوانةِ دون أن يلامسوا أرضَها. ما أقلُّ قيمةٍ لمعاملِ الاحتكاكِ بين ثيابِ اللاعبِ وجدارِ الأسطوانةِ تكفي لمنعِ اللاعبِ من الانزلاقِ إلى أسفلِ الجدار؟ (ملاحظة: تذكرْ أن $F_s = \mu_s F_n$ حيث القوّةُ المتعامدةُ هي القوّةُ التي تحقّقُ الحركةَ الدائرية.)



الشكل 1-16

المشاريع والتقارير

.1 اقلبْ درّاجةً هوائية رأسًا على عقب. ضع إشارتينِ على أحدِ قضبانِ الدولابِ الأمامي، واحدةً قربَ الإطارِ الخارجيّ والأخرى قربَ المحور. اغزلِ الدولابَ الأماميّ، أيُّ النقطتينِ تبدو لك أسرع؟ دعْ زميلينِ لك يُعدّا الدوراتِ التي تنجزُها كلٌّ من النقطتين. احسُبِ السرعةَ الزاويّةَ والسرعةَ الخطّيةَ لكلٍّ منهما. أعدِ التجربةَ مع نقطتينِ أخريين. ضعْ رسمًا بيانيًّا وحلِّلِ العلاقةَ بين السرعةِ الخطّيةِ والسرعةِ الزاويّة.

.2 عندما تقودُ درّاجةً هوائية، تنتقلُ الحركةُ الدورانيةُ من الدوّاساتِ إلى الدولابِ المطاطيِّ الخلفيِّ بوساطةِ الدولابِ المسنّنِ الأماميِّ والسلسلةِ والدولابِ المسنّنِ الخلفي. ادرسِ العلاقةَ بين هذه المكوّنات، وقسِ اختلافَ كلٍّ من السرعتينِ الزاويّةِ والخطّيةِ بين منطقةٍ وأخرى من الدرّاجة. قارنْ سرعةَ الدولابِ الخلفيِّ بالسرعةِ الزاويّةِ للدوّاسات؟ اعرضْ ما تتوصّلُ إليه أمامَ زملائِك.

.3 قم ببحثٍ حولَ التطوُّرِ التاريخيِّ لمفهومِ قوةِ الجاذبية. لاحظِ الطريقةَ التي تطوَّرتْ بها أفكارُ العلماءِ عن الجاذبيةِ مع مرورِ الزمن. حدِّدْ مساهماتِ العلماءِ في ذلك، وكيف استفادَ كلٌّ من غاليليو ونيوتن وآينشتاين من مساهماتِ علماء سبقوهم؟ حلِّلْ وراجعْ وانتقدِ التفسيراتِ العلميةَ المختلفةَ للجاذبية. سلِّطِ الضوءَ على فرضياتِ ونظرياتِ كلٍّ من العلماء. ما نِقاطُ القوّةِ وما نقاطُ الضّعْفِ في كلٍّ من هذه النظريات؟ كيف ينظرُ العلماءُ إلى الجاذبيةِ اليوم؟ استعمل الأدلَّةَ العلمية وغيرَها من المعلوماتِ لدعمِ إجاباتِك. اكتبْ تقريرًا أو حضِّرْ تقديمًا شفهيًّا لتُشرِكَ زملاءَكَ في استنتاجاتِك.

تقويمُ الفصل 1

اختيارٌ من متعدِّد

1. يسير جسم على دائرة بسرعة ذات مقدار ثابت. أي مما يلي لا يصحّ في حركة الجسم؟

أ. تعجيله المركزي يكون باتّجاه مركز الدائرة.

ب. سرعته المماسية ثابتة.

ج. متّجه سرعته ثابت.

د. يتأثّر الجسم بقوّة مركزية.

استعملِ النصّ أدناه للإجابة عن السؤالين 2 و 3.

سيّارة تسير بسرعة مقدارها 15 m/s على سطح أفقي تنحرف على دائرة نصف قطرها 25 m.

2. ما التعجيل المركزي للسيّارة؟

أ. 2.4×10^{-2} m/s^2 ج. 9.0 m/s^2

ب. 0.60 m/s^2 د. صفر

3. ما السبب المباشر للتعجيل المركزيّ لسيارة؟

أ. حركة السيارة في خط مستقيم.

ب. حركة السيارة بسرعة ثابتة.

ج. قوّة الاحتكاك بين الإطارات والطريق.

د. قوّة التعامد بين الإطارات والطريق.

4. تدور الأرض (كتلتها $m = 5.97 \times 10^{24}$ kg) حول الشمس (كتلتها $M = 1.99 \times 10^{30}$ kg) بمتوسّط مسافة 1.5×10^{11} m. ما قوّة الجاذبية التي تؤثّر بها الشمس في الأرض؟ $(G = 6.673 \times 10^{-11}\ \text{N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2)$

أ. 5.29×10^{32} N ج. 5.90×10^{-2} N

ب. 3.52×10^{22} N د. 1.77×10^{-8} N

5. أي مما يلي يعتبر تفسيرًا مناسبًا للتعبير التالي؟

$$a_g = g = G\frac{m_E}{r^2}$$

أ. شدَّة مجال الجاذبية تتغيّر بتغيُّر بُعد الجسم عن الأرض.

ب. تعجيل السقوط الحرّ يتغيَّر بتغيُّر بُعد الجسم عن الأرض.

ج. تعجيل السقوط الحرّ لا يعتمد على كتلة الجسم.

د. كلّ التفسيرات السابقة صحيحة.

6. ما البيانات التي تلزمك لحساب السرعة المدارية لقمر اصطناعي حول كوكب؟

أ. كتلة القمر وكتلة الكوكب ونصف قطر المدار.

ب. كتلة القمر ونصف قطر الكوكب ومساحة المدار.

ج. كتلة القمر ونصف قطر المدار فقط.

د. كتلة الكوكب ونصف قطر المدار فقط.

7. أي مما يلي يصف العلاقة المدارية بين الأرض والشمس بشكل صحيح؟

أ. تدور الشمس حول الأرض بمسار دائري.

ب. تدور الأرض حول الشمس بمسار دائري.

ج. تدور الشمس حول الأرض بمسار إهليليجي تكون الأرض إحدى بؤرتَيْه.

د. تدور الأرض حول االشمس بمسار إهليليجي تكون الشمس إحدى بؤرتَيْه.

8. أي من النصوص التالية صحيحًا؟

أ. كل من الكتلة والوزن يتغيّر بتغيُّر الموقع.

ب. الكتلة تتغيَّر مع الموقع في حين أن الوزن لا يتغيّر.

ج. الوزن يتغيّر مع الموقع في حين أن الكتلة لا تتغيّر.

د. كل من الكتلة والوزن لا يتغيّر مع الموقع.

9. أي من علماء الفلك اكتشف أن الكواكب تدور في مسارات إهليليجية وليس دائرية؟

أ. جوهنز كبلر. ج. تايشو بريث.

ب. نيكولاس كوبرنيكوس. د. كلوديوس بتولمي.

أسئلة ذات إجابة قصيرة

10. هل الجسم المتحرِّك على مسار دائري جسم متزن؟ لماذا؟

أسئلة ذات إجابة مطوّلة

11. يدور المرّيخ حول الشمس وكتلتها $M = 1.99 \times 10^{30}$ kg في مدار متوسّط نصف قطره 2.28×10^{11} m. احسب السنة بالنسبة إلى المريخ بدلالة الأيام على سطح الأرض. $(G = 6.673 \times 10^{-11}\ \text{N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2)$



الفصل 2

الاتزان والحركة الدورانية

Rotational Equilibrium and Dynamics



أحد أنواع الدرّاجات الهوائية المشهورة التي ظهرت عام 1870 هو درّاجة القرش-ربع القرش الظاهرة في الصورة. أطلق على الدرّاجة هذا الاسم لأن نسبة قطر دولابها الأكبر إلى الأصغر تشابه نسبة القرش الإنكليزي إلى ربع القرش القديم. لم يكن للدراجات الأولى تروس، بل دوّاسات متصلة مباشرة بمحور الدولاب الأكبر، فيدور الدولاب دورة واحدة كلما دارت الدواسة دورة واحدة. أما الدراجات الحديثة فهي مجهّزة بتروس وسلاسل متعددة.

ما يُتوقَّعُ تحقيقُهُ

ستتعلّم في هذا الفصل شروط اتزان الأجسام الصلبة، وخصائص الحركة الدورانية لجسم صلب حول محور ثابت.

ما أهميَّتُهُ

تشكّل الحركة الدورانية جزءًا مهمًّا من عمل المولدات الكهربائيّة والمحركات والكثير من الأجهزة المنزلية كالغسالات والخلاطات وأجهزة التسجيل وغيرها. إن فهمنا لخصائص الحركة الدورانية يفيدنا في تفسير طريقة عمل هذه الأجهزة.

محتوى الفصل 2



العزم
Torque

2-1 أهداف القسم

- يوضحُ الفرقَ بين جسيمٍ وجسمٍ ذي أبعاد.
- يميّزُ بين القوةِ والعزم.
- يحسُبُ مقدارَ العزمِ على جسم.
- يحدِّدُ ذراعَ العزمِ على جسم.

مقدارُ العزم

طُلِبَ إليكَ التحكيمُ في سباقٍ بين ثلاثةِ أجسام، هي كرةٌ صلدةٌ وأسطوانةٌ صلبةٌ وأسطوانةٌ مجوّفة. رغبَ إليك الجمهورُ في أن تكونَ الفرصُ أمامَ الأجسامِ في السباقِ متكافئة. لذلك عليك أن تتأكدَ من أن لكلٍّ منها الكتلةَ نفسَها ونصفَ القطرِ نفسَه، وأنها جميعًا تنطلقُ من السكون. بعدها تدعُ الأجسامَ الثلاثةَ تتدحرجُ على منحدرٍ طويل. هل هناك طريقةٌ للتنبُّؤِ بنتيجةِ السباقِ ومعرفةِ أيِّ جسمٍ سيصلُ قبل الآخر؟

إذا قمتَ بهذه التجربةِ فعلاً (كما في النشاطِ العمليِّ السريعِ على الصفحةِ التالية)، تلاحظُ أن الكرةَ تصلُ أولاً، تليها الأسطوانةُ الصلبة، ثم الأسطوانةُ المجوّفة. تعتبرُ هذه النتيجةُ مفاجئةً إلى حدٍّ ما، إذ لا يحدث التدحرج في غيابِ الاحتكاك فتنزلقُ جميع الأجسامِ بالتعجيلِ نفسه، ويكونُ التعجيلُ نتيجةً للجاذبيةِ هو نفسَه للأجسامِ الثلاثةِ بالقربِ من سطحِ الأرض. ومع ذلك لا يكون تعجيلُ الأجسامِ الثلاثةِ متساويًا في حالةِ التدحرج.

في الفصولِ السابقةِ وُصِفَتْ حركةُ الأجسامِ بناءً على اعتبارِها جسيماتٍ ليس لها أبعاد. لكنَّ هذا الافتراضَ لا يفسِّرُ الاختلافَ في حركةِ الأجسامِ في السباق. يعودُ الاختلافُ إلى أن الأجسامَ لها حجومٌ وأشكالٌ معيّنة، ولا يمكنُ اعتبارُها في هذه الحالةِ مجرّدَ جسيمات. فبالرغمِ من أن الأجسامَ ذاتَ الأبعادِ يمكنُ اعتبارُها كجسيماتٍ لوصفِ حركاتِ مراكزِ كتلِها، فإننا بحاجةٍ إلى نموذجٍ أكثرَ تطوُّرًا لوصفِ حركتِها الدورانية.

فصلُ الحركةِ الدورانية عن الحركةِ الانتقالية

افترضْ أنك تدحرجُ كرةً في لعبةِ البولينغ. ماذا يحدثُ عندما تصطدمُ الكرةُ بالأهداف، كما في **الشكل 2-1**؟ تطيرُ الأهدافُ إلى الخلفِ، وتدورُ في الهواء. يمكنُ تقسيمُ الحركةِ المعقّدةِ لكلِّ هدفٍ إلى حركتينِ منفصلتين، إحداهما انتقاليةٌ والأخرى دورانية، بحيثُ يمكنُنا تحليلُ كلٍّ منهما على حدة. نركِّزُ الآنَ في الحركةِ الدورانيةِ لجسمٍ معيَّن. ويمكنُنا لاحقًا دمجُ الحركةِ الدورانيةِ لجسمٍ في حركتِهِ الانتقالية.



الشكل 2-1
يمكنُ للجسمِ ذي الأبعاد، ككرةِ البولينغ أو أهدافِها، أن يكونَ له حركةٌ انتقاليةٌ وحركةٌ دورانية.

العزمُ والدوران

تخيلْ هرّةً تحاولُ أن تخرجَ من بيتِها بالضغطِ عموديًّا على بابٍ دوّار، كما في **الشكل 2-2**. يمكنُ للباب أن يدورَ حول خطٍّ يمرُّ في مفصّلتَيْه، وهو محور دورانِ الباب. عندما تضغطُ الهرّةُ على الطرفِ الخارجيِّ للبابِ بقوّةٍ عموديةٍ عليه تتمكّنُ من فتحِه. إن قدرةَ القوةِ على تدويرِ جسمٍ حول محورٍ معيّنٍ يُعبَّرُ عنها بكمّيةٍ تسمّى **العزم** torque.

العزم

كمّيةٌ تعبِّرُ عن مقدرةِ القوةِ لتدويرِ جسمٍ حول محورٍ معيّن.

العزمُ والقوّةُ وذراعُ الدوران

إذا ضغطتِ الهرَّةُ على البابِ بالقوّةِ نفسِها، لكنْ عند نقطةٍ أقربَ إلى محورِ دورانِه، يكونُ فتحُهُ أصعب. لذلك فإن سهولةَ دورانِ جسمٍ معيّنٍ لا تعتمدُ فقط على القوّةِ المطبَّقةِ بل أيضًا على النقطةِ التي تُطبَّقُ عندها تلك القوّة. كلما كانتِ القوّةُ أبعدَ عن محورِ الدورانِ كان دورانُ الجسمِ أسهلَ ومقدارُ العزمِ أكبر. تسمّى المسافةُ العموديةُ من محورِ الدورانِ إلى الخطِّ الواقعِ على امتدادِ اتّجاه القوة **ذراعَ الدوران** lever arm أو ذراعَ العزم.

ذراعُ الدوران

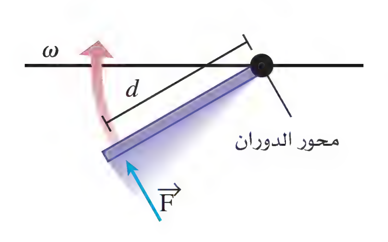
المسافةُ العموديةُ من محورِ الدورانِ إلى الخطِّ المرسومِ على امتدادِ اتجاهِ القوة.



الشكل 2-2

البابُ الذي يدورُ حول مفصّلتينِ يمكِّنُ الهرة من الدخولِ إلى بيتِها والخروجِ منه عندما تريد.

يوضحُ **الشكل 2-3** رسمًا لقوَّةٍ $\vec{F}$ تطبِّقُها الهرَّةُ بشكلٍ عموديٍّ على بابٍ دوّار. بالمقارنةِ مع تعريفِ ذراعِ الدوران، تلاحظُ أن هذه الذراعَ هي المسافةُ d من أنفِ الهرَّةِ إلى مفصَّلتَي الباب. إن d هي المسافةُ العموديةُ من محورِ الدورانِ إلى الخطِّ الواقعِ على امتدادِ القوّةِ المطبّقة. إذا ضغطتِ الهرةُ على البابِ عند نقطةٍ أعلى يصبحُ ذراعُ الدورانِ أقصر، مما يُنتِجُ عزمًا أقلَّ كما مع **الشكل 2-3**.



الشكل 2-3

يمكنُ للقوةِ المطبّقةِ على جسمٍ ذي أبعادٍ أن تُنتِجَ عزمًا يؤدّي إلى دوران.

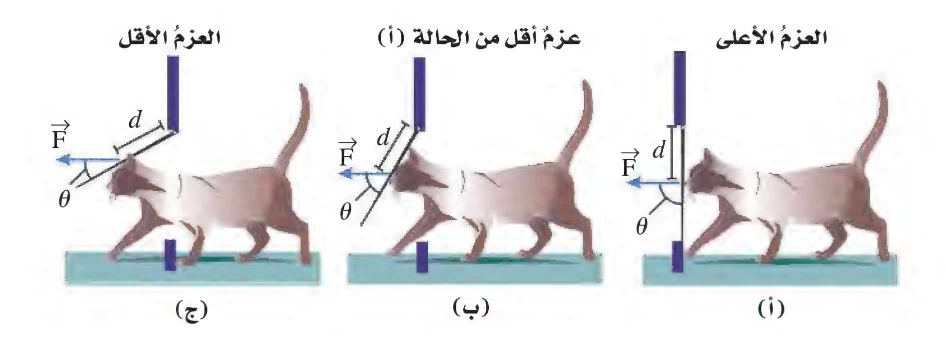
نشاط عملي سريع

سباقُ جسمين

الموادّ

- ✓ أسطواناتٌ صلبةٌ مختلفة، كعلبِ المعلّباتِ غيرِ المفتوحة.
- ✓ أسطواناتٌ مجوّفةٌ مختلفة، كعلبِ المعلّباتِ الفارغةِ المنزوعِ غطاؤُها وأرضُها، والأنابيبِ المعدنيةِ أو البلاستيكيةِ ذاتِ الأطوالِ المختلفةِ والأقطارِ المختلفة.
- ✓ كراتٌ مختلفة، ككرةِ غولف وكرةِ تنس وكرةِ بيسبول
- ✓ منحدرٌ طولُه حواليْ 1 m.

ضعْ أيَّ جسمينِ من الأجسامِ الواردةِ في لائحةِ الموادِّ عند أعلى المنحدَر، ودعْهما من السكون. أيُّهما يصلُ إلى أسفلِ المنحدَرِ أوّلاً؟ أعدِ السباقَ بعد اختيارِ مجموعةٍ أخرى من الأجسام. حاولْ أن تتوصَّلَ إلى قاعدةٍ عامةٍ تمكِّنُكَ من معرفةِ الجسمِ الذي سيفوزُ في السباق. (ملاحظة: يمكنُكَ أن تفكرَ بعواملَ كالكتلةِ والحجمِ والشكل.)



الشكل 2-4
تضغطُ الهرَّةُ على البابِ نفسِهِ من المسافةِ نفسِها من المحورِ، وبالقوَّةِ نفسِها، لكن مقدارَ العزمِ يختلفُ من مرَّةٍ إلى أخرى.

العزمُ والزاويةُ بينَ القوَّةِ وذراعِ الدورانِ

لا يُشترَطُ في القوى أن تكونَ متعامدةً مع الجسمِ لكي تسبِّبَ دورانَه. عُدْ إلى بابِ الهرَّة الدوّارِ مرَّةً أخرى. ما الذي يحدثُ إذا ضغطتِ الهرَّةُ على البابِ بقوَّةٍ غيرِ عموديةٍ، بل بزاويةٍ أخرى، كما في **الشكل 2-4**؟ إن البابَ سيدورُ لكنْ ليس بالسهولةِ نفسِها.

يُرمَزُ إلى العزمِ بالحرفِ اليونانيِّ تاو (τ)، ويُعطى مقدارُ العزمِ بالعلاقةِ التاليةِ:

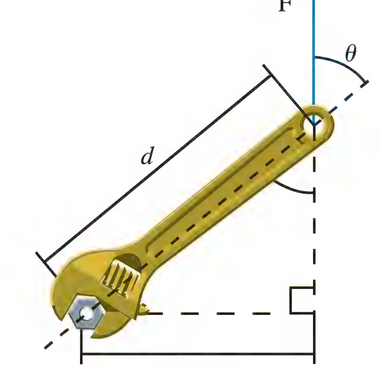
العزم

$$\tau = Fd(\sin\theta)$$

العزم = القوة × ذراع الدوران

إن وحدةَ قياسِ العزمِ في نظامِ SI هي N•m. لاحظْ أن إدخالَ θ في تعريفِ العزمِ، وهي الزاويةُ بين القوةِ والمسافةِ العموديةِ إلى محورِ الدورانِ، يأخذُ في الحسبانِ تغيُّراتِ العزمِ الظاهرةِ في **الشكل 2-4**.

يَظهرُ في **الشكل 2-5** مِفَكٌّ يدورُ حول صمولة. في هذه الحالةِ هناك زاويةٌ θ بين القوَّةِ والمِفَكِّ. الكمّيةُ $d(\sin\theta)$ هي المسافةُ العموديةُ من محورِ الدورانِ إلى الخطِّ الواقعِ على امتدادِ اتجاهِ القوَّةِ، وهذه هي ذراعُ الدورانِ.



الشكل 2-5
اتجاهُ ذراعِ الدورانِ يكونُ دائمًا عموديًّا على اتجاهِ القوَّةِ المطبّقةِ.

إشارةُ العزم

العزمُ كمّيةٌ اتجاهية كالإزاحةِ والقوَّةِ. إلا أننا سنتعاملُ معه، في هذا الكتاب، ككمّيةٍ عددية، لذلك نعطيهِ إشارةً موجبة أو سالبة، بحسبِ اتجاهِ دورانِ الجسمِ تحت تأثيرِ القوَّة. تكونُ إشارةُ العزمِ موجبةً، إذا كان اتجاهُ الدورانِ معاكسًا لاتجاهِ دورانِ عقاربِ الساعة، وسالبةً إذا كان في اتجاهِها. تذكَّرْ أيضًا أن للقوى والإزاحاتِ إشاراتٍ موجبةً أو سالبةً وفق العرفِ الوارد في كتابِ الصفِّ الحادي عشر.

من أجلِ تحديدِ إشارةِ العزم، افترضْ أن هذا العزمَ هو الوحيدُ الذي يؤثِّرُ في دورانِ الجسم، وتخيّلِ اتجاهَ دورانِ الجسمِ تحت تأثيرِ هذا العزم. إذا أثّرتْ في الجسمِ عدةُ قوًى، فإن كلاً منها تؤدي إلى اتجاهٍ معيّنٍ للدورانِ يتمُّ تحديدُهُ بشكلٍ منفصل. تذكّرْ أن تعطيَ كلَّ عزمٍ الإشارةَ المناسبة.

تخيّلْ مثلاً أنك تشدُّ بابًا بقوَّةٍ $\vec{F}_1$ عموديةٍ عليه، وأن زميلاً لك يدفعُهُ في الاتجاهِ المعاكسِ بقوَّةٍ $\vec{F}_2$. افترضْ أنك تسبِّبُ دورانًا للبابِ في اتجاهٍ معاكسٍ لدورانِ عقاربِ

الساعة، عندها يكونُ مقدارُ العزمِ الذي تطبِّقُه موجبًا F_1d_1. أما مقدارُ العزمِ الذي يطبِّقُهُ زميلُكَ فيكونُ سالبًا $-F_2d_2$. ولحسابِ محصِّلةِ العزومِ المؤثّرةِ في البابِ تجمعُ العزمين:

$$\tau_{\text{المحصلة}} = \Sigma\tau = \tau_1 + \tau_2 = F_1d_1 + (-F_2d_2)$$

أمعنِ النظر عند استعمالِكَ الإشاراتِ بطريقةٍ صحيحة، يمكنُكَ معرفةُ اتجاهِ الدورانِ من إشارةِ محصِّلةِ العزوم.

مثال 2 (أ)

العزم

المسألة

يؤثرُ لاعبانِ في كرةِ سلّةٍ في اتجاهينِ متعاكسين. يطبّقُ أحدُهما قوّةً مقدارُها 11 N إلى أسفلَ عن بعدِ 7.0 cm من محورِ الدوران، بينما يطبّقُ الآخرُ قوّةً أخرى مقدارُها 15 N إلى أعلى عن بعدِ 14 cm من المحورِ نفسِه، لكن من الجهةِ المقابلة. جدْ محصّلةَ العزومِ المؤثّرةِ في الكرة.

الحــلّ

1. أعرّف

المعطى:

$F_1 = 15\ \text{N}$ $F_2 = 11\ \text{N}$

$d_1 = 0.14\ \text{m}$ $d_2 = 0.070\ \text{m}$

المجهول: $\tau_{\text{المحصلة}} = ?$

2. أخطّط

الرسم:

$\vec{F}_2 = 11\ \text{N}$

$d_1 = 0.14\ \text{m}$

$d_2 = 0.070\ \text{m}$

$\vec{F}_1 = 15\ \text{N}$

أختارُ المعادلة: أطبّقُ تعريفَ العزمِ لكلِّ قوّةٍ ثم أجمعُ العزمين.

$$\tau = Fd$$

$$\tau_{\text{المحصلة}} = \tau_1 + \tau_2 = F_1d_1 + F_2d_2$$

3. أحسُب

أعوّضُ في المعادلةِ وأحل: أحسُبُ أولاً العزمَ الناتجَ عن كلِّ قوة. بما أن اتجاهَ الدورانِ الناتجِ عن كلِّ قوةٍ هو اتجاهُ عقاربِ الساعة، فإن كلا العزمينِ سالبان.

$$\tau_1 = F_1d_1 = -(15\ \text{N})(0.14\ \text{m}) = -2.1\ \text{N•m}$$

$$\tau_2 = F_2d_2 = -(11\ \text{N})(0.070\ \text{m}) = -0.77\ \text{N•m}$$

$$\tau_{\text{المحصلة}} = -2.1\ \text{N•m} - 0.77\ \text{N•m}$$

$$\boxed{\tau_{\text{المحصلة}} = -2.9\ \text{N•m}}$$

جوابُ الآلةِ الحاسبة

الجوابُ الذي تعطيهِ الآلةُ الحاسبةُ هو 2.87. لكنَّ الجوابَ يقرّبُ إلى 2.9 وفق قاعدةِ جمعِ الأرقامِ المعنوية.

4. أقيّم

بما أن محصّلةَ العزومِ سالبة، فالكرةُ تدورُ في اتجاهِ دورانِ عقاربِ الساعة.

تطبيق 2 (أ)

العزم

1. يتألّفُ بندولٌ بسيطٌ من جسيمٍ كتلتُهُ 3.0 kg يتدلّى بخيطٍ خفيفٍ طولُهُ 2.0 m مربوطٍ في نقطةٍ ويدورُ حولها.

أ. جدْ مقدارَ عزمِ الدوران حول النقطةِ نتيجةً لوزنِ الجسيم، عندما تكونُ الزاويةُ بين الخيطِ والاتجاهِ الرأسي 5.0^{o}.

ب. أعدِ الحساباتِ حين تصيرُ الزاويةُ 15.0^{o}.

2. إذا كان مقدارُ العزمِ المطلوبِ لفكِّ صمولةٍ من دولابِ سيارةٍ 40.0 N•m، فما القوةُ الأقلُّ التي يجبُ أن يطبّقَها الميكانيكيُّ عند طرفِ مفتاحٍ طولُهُ 30.0 cm ليفكَّ الصمولة؟

مراجعةُ القسم 1-2

1. في أيٍّ من الحالاتِ التاليةِ يمكنُ اعتبارُ الجسمِ مجردَ كتلةٍ نقطيةٍ (جسيمًا)؟ وفي أيِّ حالاتٍ يجبُ اعتبارُهُ جسمًا ذا أبعاد؟

أ. كرةٌ رُميتْ من سقفِ بيت.

ب. كرةٌ تتدحرَجُ نحو الهدف.

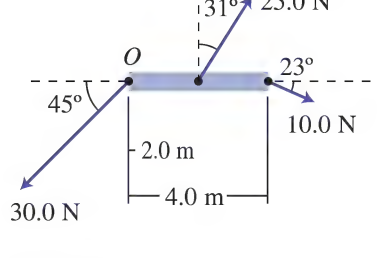
ج. دولابٌ هوائيٌّ يدور.

د. الأرضُ تدورُ حولَ الشمس.

2. ما الكمّيّةُ الدورانيةُ المقابلةُ للقوّة؟ على أيِّ كمياتٍ تعتمد؟

3. جدْ عزمَ كلِّ قوةٍ تؤثِّرُ في القضيبِ في **الشكل 2-6**. افترضْ أن محورَ الدورانِ عموديٌّ على الصفحةِ ويمرُّ في النقطة O. في أيِّ اتجاهٍ يدورُ القضيب؟

4. كيف تتغيَّرُ القوَّةُ اللازمةُ لفتحِ بابٍ إذا وُضِعَتْ قبضةُ البابِ في وسطِه؟



الشكل 2-6

5. **الفيزياءُ في الحياةِ اليومية:** كيف يؤثِّرُ طولُ ذراعِ الدوّاسةِ في مقدارِ العزمِ المطبّقِ لتحريكِ الدولابِ الأماميِّ لدراجةٍ هوائية؟



الدورانُ والقصورُ الذاتي
Rotation and Inertia

2-2 أهداف القسم

- يحددُ مركزَ كتلةِ جسم.
- يميّزُ بين الكتلةِ وعزمِ القصورِ الذاتيّ.
- يعرِّفُ الشرطَ الثانيَ للاتزان.
- يحلُّ مسائلَ تتضمنُ شرطَي الاتّزان.

مركزُ الكتلة

يسهلُ تحديدُ محورِ الدورانِ للبابِ الدوّارِ لبيتِ الهرة، فالبابُ يدورُ حولَ مفصّلتيه، لأنه يطبّقُ قوّةً تثبّتُ المفصّلتينِ في مكانهما. تخيَّلِ الآنَ أنك ترمي عصًا في الهواء. كيف يمكنُكَ تحديدُ النقطةِ التي تدورُ حولَها العصا وهي في الهواء؟ العصا ليستْ مثبَّتةً في أيِّ نقطة. لكن هناك نقطةً محدَّدةً تدورُ العصا حولَها تحت تأثيرِ الجاذبيةِ فقط، تسمّى **مركزَ الكتلة** center of mass.

مركز الكتلة

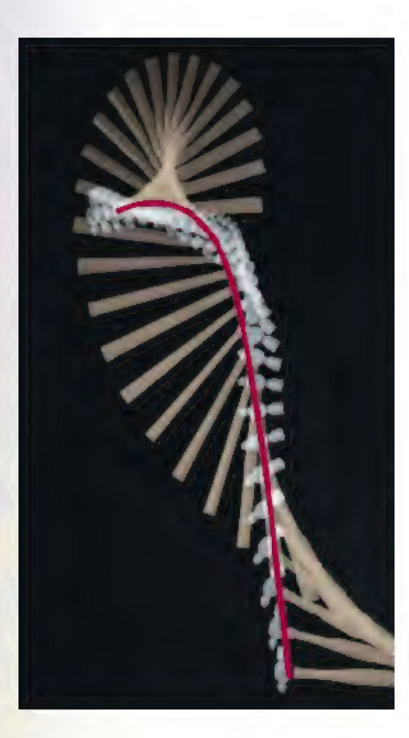
النقطةُ التي يمكنُ تجميعُ كل كتلةِ الجسمِ عندها لدى دراسةِ حركته الانتقالية.

دمجُ الحركتينِ الانتقاليةِ والدورانية

إن مركزَ كتلةِ جسمٍ معيّنٍ هو أيضًا النقطةُ التي يمكنُ الافتراضُ أن كلَّ كتلتِهِ تتجمّع عندها. يعني ذلك أن الحركةَ الكليةَ للعصا هي محصلةُ حركتَي انتقالٍ ودوران. تدورُ العصا في الهواءِ حول مركزِ كتلتِها، بينما يتحركُ هذا المركزُ كما لو أنه نقطةٌ تتجمَّعُ فيها كتلةُ الجسمِ بأكملِها، ما يساعدُ على تحليلِ حركةِ العصا الانتقالية.

لاحظْ أن المطرقةَ في **الشكل 2-7** تدورُ حول مركزِ كتلتِها في الهواء. بينما تتعرَّضُ كل نِقاطِ المطرقةِ لحركةٍ دورانية، يتحرَّك مركزُ كتلتِها على مسارِ المقذوف. ويكونُ مركزُ كتلةِ الجسمِ المنتظمِ الشكل، كالكرةِ والمكعب، مركزَه الهندسي أيضًا.

لكن في حالةِ الأجسامِ غيرِ المنتظمةِ الشكل فإن تحديدَ مراكزِ كتلِها أكثرُ صعوبة، وهو يتجاوزُ نطاقَ هذا الكتاب. وكما أن مركزَ كتلةِ جسمٍ ذي أبعادٍ هو النقطةُ التي يمكنُ تجميعُ كتلتِهِ عندها، فإن مركزَ الجاذبيةِ هو النقطةُ التي تؤثّرُ قوةُ الجاذبيةِ فيها، كما لو أن كلَّ الكتلة تتجمعُ عندها. نعتبرُ في أغلبِ الأحيانِ مركزَ الكتلةِ ومركزَ الجاذبيةِ نقطةً واحدة.



الشكل 2-7
النقطةُ التي تدورُ حولها نِقاطُ هذا الجسم هي مركزُ كتلتِه. يتحرَّكُ مركزُ الكتلةِ على قطعٍ مكافئ.

عزمُ القصورِ الذاتيّ

هناك محاورُ دورانٍ مختلفةٌ يمكنُ أن يدورَ حولَها جسمٌ معيّن. يكونُ من السهلِ تحقيقُ دورانِ جسمٍ حول محورٍ معيّن، مقارنةً بمحاورَ أخرى، مع أن كتلةَ الجسمِ في كلتا الحالتينِ هي نفسُها. تقاسُ مقاومةُ جسمٍ لأيِّ تغيُّرٍ في حركتِهِ الدورانيةِ من خلالِ كمّيةٍ

عزمُ القصور الذاتي

هي مقدار مقاومة الجسم لأي تغير في الحركة الدورانية.

تسمّى **عزمَ القصورِ الذاتي** moment of inertia. ولكلمةِ عزمٍ في الفيزياءِ معنًى يختلفُ عن معناها الشائع. إن عزمَ القصورِ الذاتيِّ لجسمٍ معيّنٍ هو مقياسُ مقاومتِهِ لأيِّ تغيُّرٍ في حركتِهِ الدورانيةِ حول محورٍ محدَّد، ويُرمزُ إليه بالحرف (I).

التشابهُ بين عزمِ القصورِ الذاتيِّ في حالةِ الدورانِ والكتلةِ في حالةِ الانتقال

هناك تشابهٌ بين عزمِ القصورِ الذاتيِّ وبين الكتلة، لأن كلاًّ منهما مظهَرٌ من مظاهرِ القصور. لكن يوجدُ اختلافٌ بين القصورِ (أي الكتلة) الذي يقاومُ تغيُّراتِ الحركةِ الانتقالية وبين القصورِ (أي عزم القصور الذاتي) الذي يقاومُ التغيُّراتِ في الحركةِ الدورانية. الكتلةُ كمّيةٌ لها علاقةٌ بالجسمِ وحدَه، في حين أن عزمَ القصورِ الذاتيِّ يعتمدُ على كتلةِ الجسم وعلى توزيعِ الكتلةِ حول محورِ الدوران. كلما ابتعدتِ الكتلةُ عن محورِ الدوران ازدادَ عزمُ القصورِ الذاتيّ، وأصبحَ بالتالي دورانُ الجسمِ أصعب. لذلك وَصَلتِ الكرةُ الصلدةُ قبلَ الأسطوانةِ الصلبةِ والأسطوانةِ المجوّفةِ في سباقِ المنحدر. فكتلةُ الأسطوانةِ المجوّفةِ مجمّعة كلُّها على محيطِها، ولها عزمُ قصورٍ ذاتيٌّ كبير، في حين أن كتلةَ الكرةِ الصلدةِ موزّعةٌ على الحجمِ بأكملِه ولها بالتالي عزمُ قصورٍ ذاتيٍّ أقلّ.

حسابُ عزمِ القصورِ الذاتيّ

ينُصُّ القانونُ الثاني لنيوتن على الآتي: إذا طُبِّقتْ قوّةٌ على جسمٍ معيّن فإن التعجيلَ الناتج يعتمدُ على كتلةِ الجسم. كذلك عندما يؤثِّرُ عزمٌ في جسمٍ فإن التغيُّرَ الناتجَ في الحركةِ الدورانيةِ يعتمدُ على عزمِ القصورِ الذاتيِّ للجسم.

توجدُ طريقةٌ محدَّدةٌ لحسابِ عزمِ القصورِ الذاتيّ، وهي غيرُ مطلوبةٍ في هذا الكتاب، لكنْ هناك قيمًا مبسّطةً لبعضِ الأشكالِ المعروفة، كما نراهُ موضحًا في **الجدول 1-2**. هذا الجدولُ يمكنُ استعماله عند الحاجةِ للحصولِ على عزمِ القصورِ الذاتيِّ

نشاط عملي سريع

إيجادُ مركزِ الكتلةِ مختبريًا

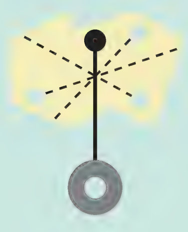
الموادّ

- ✓ قطعةُ كرتون
- ✓ مِقَصّ
- ✓ خَرّامة
- ✓ دبوسٌ أو مسمار
- ✓ لوح فلّين
- ✓ خيطٌ طولُه 40 cm
- ✓ مسطرة
- ✓ قلم
- ✓ وزن (حلقة مثلاً)

اقطعْ شكلاً غيرَ منتظمٍ من قطعةِ الكرتون، وأحدثْ فيه عدةَ ثقوبٍ موزعةٍ على حافته. علِّقِ الشكلَ على لوحِ الفلّين بوساطةِ دبوسٍ داخل في أحد الثقوب، بحيث يدورُ الشكلُ بحرّيةٍ حول الدبوس. (يمكنُكَ أيضًا تعليقُ الشكلِ بمسمارٍ مثبتٍ في جدار.)

علِّقِ الوزنَ في أحدِ طرفي الخيط، ثم اربطْ الطرفَ الآخرَ بالدبوس.

عندما يتوقفُ الخيطُ عن الحركة، ارسمْ خطًّا على اللوحِ على امتدادِ الخيط.



أعدِ التجربةَ مع كلٍّ من الثقوبِ على مدارِ الشكل. ستجدُ أن مركزَ الكتلةِ هو نقطةُ تقاطعِ الخطوطِ المرسومةِ على اللوح.

للأشكالِ الواردةِ فيه.

يقاسُ عزمُ القصورِ الذاتيِّ بوَحْدةٍ هي $kg{\cdot}m^2$. نحصُلُ على فكرةٍ أوليةٍ عن مقدارِ هذه الوحدة، لدى ملاحظتِنا أن عزمَ القصورِ الذاتيِّ لكراتِ البولينغ حول أقطارِها يتراوحُ بين $0.7\ kg{\cdot}m^2$ و $1.8\ kg{\cdot}m^2$ وذلك بحسبَ كتلةِ الكرةِ وحجمِها.

لاحظْ أن عزمَ القصورِ الذاتيِّ لكرةٍ صلبةٍ هو أقلُّ منه لحلقةٍ رقيقة، كما هو متوقَّع. في الحقيقةِ إن عزمَ القصورِ الذاتيِّ للحلقةِ الرقيقةِ حول محورِ تماثلِها الذي يمرُّ في مركزِها هو أقصى عزمِ قصورٍ ذاتيٍّ مقارنةً بأيِّ شكلٍ آخر.

لاحظْ أيضًا أن عزمَ القصورِ الذاتيِّ لجسيمٍ يدورُ في دائرة، ككرةٍ مربوطةٍ بخيط، هو نفسُه العزمُ الذي للحلقةِ الرقيقةِ ذاتِ الكتلةِ نفسِها، إذا كانَ طولُ الخيطِ يساوي نصفَ قطرِ الحلقة. يعني ذلك أن المسافةَ بين الكتلةِ ومحورِ الدورانِ وحدَها تؤثرُ في حسابِ عزمِ القصورِ الذاتيِّ لأيِّ شكلٍ من الأشكال. وما دامت المسافةُ إلى محورِ الدورانِ ثابتة، فإن توزيعَ الكتلةِ عندها لا يؤثِّرُ في قيمةِ عزمِ القصورِ الذاتيّ.

يُظهِرُ **الجدول 2-1** أن عزمَ القصورِ الذاتيِّ لقضيبٍ رقيق يكون أكبرَ عندما تكونُ الكتلةُ أكبرَ أو عندما يكونُ القضيبُ أطول.

إذا أُمسِكَ بمَضرَبِ الكرةِ من طرفِه، يكون لطولِهِ أقصى قيمةٍ بالنسبةِ إلى محورِ الدوران. بذلك يكونُ عزمُ قصورِهِ الذاتيِّ أقصى ما يمكن. يتناقصُ عزمُ القصورِ الذاتيّ، ويصبحُ من الأسهلِ تحريكُ المضربِ دورانيًّا كلما كان محورُ الدورانِ أقربَ إلى المركز. يُمسِكُ لاعبُ البيسبول المضربَ أحيانًا عند هذه النقاطِ القريبةِ من المركز، إما لأن كتلةَ المضربِ M كبيرة، وإما لأن طولَ المضرب ℓ كبير. في الحالتينِ يقلّلُ اللاعبُ عزمَ القصورِ الذاتيِّ للمضرب.

الجدول 2-1 عزمُ القصورِ الذاتيِّ لبعضِ الأشكال

الشكل		عزمُ القصورِ الذاتيّ	الشكل		عزمُ القصورِ الذاتي
	حلقةٌ رقيقةٌ (اسطوانةٌ رقيقةٌ) حول محورِ تماثُلها	MR^2		قضيبٌ رقيقٌ حول محورٍ عموديٍّ عليه ويمرُّ في مركزِهِ	$\frac{1}{12}M\ell^2$
	حلقةٌ رقيقةٌ حول قطرِها	$\frac{1}{2}MR^2$		قضيبٌ رقيقٌ حول محورٍ عموديٍّ عليه ويمرُّ في طرفه	$\frac{1}{3}M\ell^2$
	جسيمٌ حول محور	MR^2		كرةٌ صلدةٌ حول قطرِها	$\frac{2}{5}MR^2$
	قرصٌ أو أسطوانةٌ صلدة حول محورِ التماثل	$\frac{1}{2}MR^2$		كرةٌ مجوفةٌ حول قطرِها	$\frac{2}{3}MR^2$

الاتّزانُ الدورانيّ



الشكل 2-8
القوّتانِ المؤثّرتانِ في الطاولةِ متساويتانِ ومتعاكستانِ، ومع ذلك تتحرّكُ الطاولة. كيف يحدثُ ذلك؟

تخيّلْ أنكَ تحاولُ مع زميلٍ لك تحريكَ طاولةٍ ثقيلة، وأنكما بدلاً من دفعِكما لها في اتجاهٍ واحد تدفعانِها في اتجاهينِ متعاكسين، كما في **الشكل 2-8**. إذا كان للقوتينِ المقدارُ نفسُه واتجاهانِ متعاكسانِ، فإن زميلَكَ قد يعتقدُ أن القوّتينِ متعادلتان وأن شرطَ الاتزانِ يتحقّق. يقولُ زميلُكَ إن الطاولةَ لن تتحرَّك. إلا أنها في الواقعِ تتحرَّك؛ إنها تدورُ في مكانِها.

شرطا الاتّزان

يمكنُ للطاولةِ أن تتحرَّكَ بالرغمِ من أن محصّلةَ القوى المؤثّرةَ فيها صفر، وذلك لأن محصّلةَ العزومِ ليست صفرًا. إذا كانت محصّلةُ القوى المؤثّرةِ في جسمٍ معيّنٍ صفرًا، يكونُ الجسمُ في حالةِ اتزانٍ انتقاليّ. وإذا كانت محصلةُ العزومِ المؤثّرةِ في الجسمِ صفرًا يكونُ في حالةِ اتزانٍ دوراني. لكي يكونَ الجسمُ في حالةِ اتزانٍ تامّ، انتقاليٍّ ودورانيّ، يجبُ أن تكونَ محصّلةُ كلٍّ من القوى والعزومِ صفرًا، كما نراهُ موضحًا في **الجدول 2-2** الذي يُظهرُ شرطَيِ الاتزانِ الأولَ والثانيَ على التوالي.

لتحقيقِ الشرطِ الأول للاتزانِ يجبُ جمعُ القوى المؤثّرةِ في الجسمِ جمعًا متجهًا. لكن لتحقيقِ الشرطِ الثاني يتعيَّنُ اختيارُ محورِ دورانٍ وحسابُ عزمِ كلِّ القوى التي حوله. إن عمليةَ اختيارِ محورِ الدورانِ هي محضُ اختيارية، لأن تحقيقَ شرطِ الاتزانِ الدورانيِّ لا يعتمدُ على اختيارِ محورِ الدوران. إذا كانت $\Sigma\tau = 0$ بالنسبةِ إلى محورِ دورانٍ معيَّن، فإنها ستكونُ كذلك بالنسبةِ إلى أيِّ محورِ دورانٍ آخر. تفيدُنا هذه الفكرةُ في اختيارِ محورِ دورانٍ يتقاطعُ مع خطِّ القوةِ المجهولة، إذ إن عزمَها بالنسبةِ إلى هذا المحورِ يكونُ صفرًا. لذلك يُستحسَنُ اختيارُ محورِ دورانٍ عزمُ القوةِ المجهولةِ حولَهُ صفر.

الجدول 2-2 **شرطا الاتزان**

نوعُ الاتزان	المعادلة	المعنى
الانتقالي	$\Sigma \vec{F} = 0$	محصّلةُ القوى على الجسمِ يجبُ أن تكونَ صفرًا
الدوراني	$\Sigma \tau = 0$	محصّلةُ العزومِ على الجسمِ يجبُ أن تكونَ صفرًا

مثال 2 (ب)

الاتزانُ الدورانيّ

المسألة

تُثبَّتُ عارضةٌ متجانسةٌ أفقية b، طولها 5.00 m ووزنُها 315 N، في جدارٍ بوساطةِ مفصلةٍ يمكنُ للعارضةِ الدورانُ حولها. يُحمَلُ الطرفُ الآخرُ للعارضةِ بوساطةِ حبل، الزاويةُ بينه وبين الأفقيّ 53°، في حين يقفُ شخصٌ p وزنُهُ 545 N على مسافةِ 1.50 m من المفصّلة. جِدْ قوّةَ الشدّ F_T في الحبلِ، والقوّةَ R التي تؤثّرُ بها العارضةُ في الجدار. (العارضةُ في حالةِ اتزان) كما هو موضح بالرسم.

الحــلّ

1. أعرّف

المعطى: $L = 5.00\ m$ $F_{g,b} = 315\ N$ $\theta = 53°$

$F_{g,p} = 545\ N$ $d = 1.50\ m$

المجهول: $F_T = ?$ $R = ?$

الرسم: أفترضُ أن كتلةَ الجسمِ المنتظمِ ذي الأبعادِ تتركّزُ في مركزِ كتلتِه.

1.50 m
53°
5.00 m
315 N
545 N

2. أخطّط

أختارُ معادلةً أو موقفًا: الكمّياتُ المجهولة هي R_x، R_y، F_T.
أستعملُ الشرطَ الأولَ للاتّزان في الاتجاهين x و y.

المعادلةُ في الاتجاه x: $F_x = R_x - F_T(\cos\theta) = 0$

المعادلةُ في الاتجاه y: $F_y = R_y + F_T(\sin\theta) - F_{g,p} - F_{g,b} = 0$

بما أن لدينا ثلاثَ كمّياتٍ مجهولةٍ ومعادلتين فقط، فلا يمكنُنا إيجادُ الحلولِ باستعمالِ الشرطِ الأولِ للاتزانِ وحدَه.

أختارُ نقطةَ (محورًا) لحسابِ محصلةِ العزوم: إن مفصلةَ الدورانِ مكانٌ مناسبٌ لاختيارِ محورِ الدوران، لأن عزمَ القوةِ المجهولةِ R بالنسبةِ إلى هذا المحورِ يكونُ صفرًا.

أطبّقُ الشرطَ الثانيَ للاتزان: يمكن إيجادُ المعادلةِ الثالثةِ المطلوبة، باستعمالِ الشرطِ الثاني للاتزان.

$$\tau = F_T L(\sin\theta) - F_{g,b}\frac{L}{2} - F_{g,p}d = 0$$

3. أحسب

أعوّضُ القيمَ في المعادلةِ وأحُلّ:

$$\tau = F_T(\sin 53°)(5.00\ m) - (315\ N)(2.50\ m) - (545\ N)(1.50\ m) = 0$$

$$\tau = F_T(4.0\ m) - 788\ N{\cdot}m - 818\ N{\cdot}m = 0$$

$$F_T = \frac{1606\ N{\cdot}m}{4.0\ m}$$

$$\boxed{F_T = 401.5\ N}$$

أعوِّضُ مقدارَ قوةِ الشدِّ في الحبلِ في معادلتَيِ الاتجاهين x و y للحصولِ على R.

$$F_x = R_x - F_T(\cos 53^\circ) = 0$$

$$R_x = (401.5\ \text{N})(\cos 53^\circ)$$

$$R_x = 241.62\ \text{N}$$

$$F_y = R_y + F_T(\sin 53^\circ) - 545\ \text{N} - 315\ \text{N} = 0$$

$$R_y = -320.65\ \text{N} + 860$$

$$R_y = 539.35\ \text{N}$$

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}$$

$$R = \sqrt{(241.62\ \text{N})^2 + (539.35\ \text{N})^2}$$

$$\boxed{R = 590.99\ \text{N}}$$

4. أقيِّم يجبُ أن يكونَ حاصلُ جمعِ مركّبتَيْ قوةِ الحبلِ وقوّةِ الجدارِ في الاتجاهِ y مساويًا لوزنَيِ العارضةِ والشخص. بذلك يكونُ جمعُ مقدارَيْ قوّةِ الحبلِ وقوّةِ الجدارِ أكبرَ من جمعِ وزنَيِ العارضةِ والشخص.

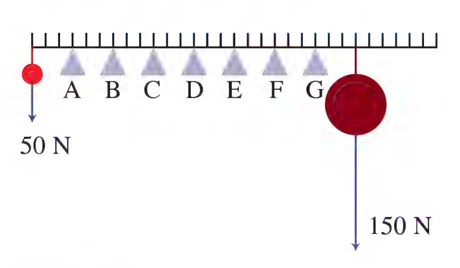
$$401.5 + 590.99 > 545 + 315$$

تطبيق 2 (ب)

الاتّزانُ الدوراني

1. يثبَّتُ جسرٌ طولُه 20.0 m ووزنُهُ 4.00×10^5 N على دعامتين تبعُد كلٌّ منهما 3.00 m عن أحدِ طرفَيِ الجسر. إذا أوقِفَتْ سيارةٌ وزنُها 1.96×10^4 N على مسافةِ 8.00 m من أحدِ طرفَيِ الجسر، فكم تكونُ القوةُ التي تطبِّقُها كلُّ دعامة؟
2. يقفُ منظِّفُ زجاجٍ وزنُهُ 700.0 N على سقالةٍ متجانسةٍ معلَّقةٍ من طرفيها بحبلين رأسيّين. تزنُ السقالةُ 200.0 N وطولُها 3.00 m. ما قوّةُ الشدِّ في كلِّ حبلٍ إذا وقفَ المنظّفُ على مسافةِ 1.00 m من أحدِ الطرفين؟
3. يجلِسُ ولدانِ وزناهما 400.0 N و 300.0 N على طرفَيْ أرجوحةٍ طولُها 2.0 m.
   أ. عند أيِّ نقطةٍ يجبُ أن تكونَ نقطةُ ارتكازِ الأرجوحةِ كي نضمَنَ الاتزانَ الدورانيّ؟ أهمِلْ وزنَ الأرجوحة.
   ب. افترضْ أن ولدًا ثالثًا وزنُهُ 225 N يجلسُ على بعدِ 0.200 m من الولدِ الذي وزنُهُ 400.0 N. أين يجبُ أن يجلسَ ولدٌ رابعٌ وزنُهُ 325 N ليتحقَّقَ الاتزان الدوراني؟

مراجعةُ القسم 2-2



الشكل 2-9

1. عند أيٍّ من المواقعِ السبعةِ الموضحةِ في **الشكل 2-9** يجبُ وضعُ نقطةِ الارتكازِ ليكونَ ما يلي؟
   أ. محصلةُ عزومٍ موجبة.
   ب. محصلةُ عزومٍ سالبة.
   ج. اتزانٌ دورانيّ.

2. حددِ الموقعَ التقريبيَّ لمركزِ كتلةِ كلٍّ من الأجسامِ التالية:
   أ. عصا مترية.
   ب. كرة بولينغ.
   ج. مكعّب ثلج.
   د. كعكة على شكل قرص.
   هـ. موزة.

3. يعتقدُ أحدُ الطلابِ أن الكتلة وعزمَ القصورِ الذاتيِّ هما الكمّيةُ نفسُها. اشرحِ الخطأ في هذا الاعتقاد.

4. أيٌّ من شرطَي الاتزان يتحقّقُ في كلٍّ من الحالاتِ التالية؟
   أ. دولابُ درّاجةٍ هوائيةٍ يتدحرجُ على طريقٍ مستوٍ بسرعةٍ ثابتة.
   ب. درّاجةٌ هوائيةٌ متوقّفةٌ عند حافةِ طريق.
   ج. عجلاتُ سيارةٍ تتباطأ.
   د. كرةٌ منطلقةٌ في الهواء.

5. يقف ولدانِ وزناهما 510 N و 350 N على لوحٍ منتظمٍ وزنُهُ 40.0 N. توضعُ نقطةُ الارتكازِ عند مركزِ كتلةِ اللوح، ويقفُ الولدُ الذي وزنُهُ 510 N على بعد 1.50 m من المركز.
   أ. أين يجبُ أن يقفَ الولدُ الثاني بحيثُ يبقى اللوحُ متزنًا؟
   ب. ما القوّةُ التي تطبّقُها نقطةُ الارتكازِ على اللوح؟

6. **الفيزياءُ في الحياةِ اليومية:** لماذا يُستحسَنُ أن يكونَ موقعُ المركزِ لكتلةِ الدراجةِ الهوائيةِ قريبًا من الأرضِ عندما تدخلُ الدرّاجةُ في دوّار؟

7. **الفيزياءُ في الحياةِ اليومية:** طوَّرَ مصمِّمُ دراجاتٍ هوائيةٍ نوعًا جديدًا بإضافةِ أوزانٍ أسطوانيةٍ إلى قضبانِ دولابَيِ الدراجة. وقد ادّعى المصمِّمُ أن ذلك يجعلُ كتلةَ الدولاب، بشكلٍ عامّ، أقربَ إلى محورِهِ مما يجعلُ عزمَ القصورِ الذاتيِّ أقلّ، فيكونُ بالتالي دورانُ الدولابِ أسهل. ما الخطأُ في هذا الادعاء؟



ديناميكا الدوران

Rotational Dynamics

2-3 أهداف القسم

- يطبّق القانون الثاني لنيوتن في حالة الدوران.
- يحسب الزخم الزاوي لأجسام متعدّدة في حركة دورانية.
- يحل مسائل تتعلّق بالطاقة الحركية الدورانية.

القانون الثاني لنيوتن في حالة الدوران

علمت في القسم 2-2 أن هناك علاقة بين محصّلة العزوم المؤثرة في جسم وتعجيله الزاوي. تكافئ هذه العلاقة القانون الثاني لنيوتن للحركة الانتقالية والذي يربط محصّلة القوى المؤثّرة في جسم بتعجيله الانتقالي. يمكن كتابة القانون الثاني لنيوتن في حالة الدوران كما يلي:

قانون نيوتن الثاني في حالة الدوران

$$\tau_{\text{المحصلة}} = I\alpha$$

محصّلة العزوم = عزم القصور الذاتي × التعجيل الزاوي

تذكّر أن محصّلةَ العزومِ الموجبة تؤدّي إلى دوران الجسمِ باتجاهِ عكسِ عقارب الساعة، ما يعني أن التعجيلَ الزاويَّ يكون أيضًا باتجاهِ عكسِ عقاربِ الساعة. كما أن محصّلةَ العزوم السالبةَ ستؤدّي إلى تعجيل زاويٍّ باتجاهِ دوران عقارب الساعة. لذلك يجب التنبه إلى إشارةِ العزومِ المؤثّرةِ في جسمٍ عند حسابِ تعجيله الزاوي.



الشكل 2-10
يُؤثّر التدفُّق المستمرّ للمياه بعزمٍ على الدولاب (الناعورة).

انظر إلى **الشكل 2-10**، حيث تسقطُ المياه باستمرار على دولاب. تؤثّرُ المياهُ الساقطةُ بقوّةٍ على حافةِ الدولابِ فتنتج عزمًا يؤدّي إلى دورانه. بينما تؤدّي قوًى أخرى كمقاومةِ الهواءِ والاحتكاكِ بين المحورِ والدولاب، إلى عزومٍ معاكسة. عندما تصبحُ محصّلةُ العزومِ المؤثّرةِ في الدولابِ صفرًا، يتابعُ الدولابُ دورانَه بسرعةٍ زاويّةٍ ثابتة، بينما يبقى مستقرًّا إذا كان في الأساسِ مستقرًّا.

يوضحُ **الجدول 2-3** بعض الكمّيات الانتقاليةِ والدورانيةِ بشكلٍ مختصر.

الجدول 2-3 القانون الثاني لنيوتن في حالتي الانتقال والدوران

الانتقال	$F = ma$	القوة = الكتلة × التعجيل الخطي
الدوران	$\tau = I\alpha$	العزم = عزم القصور الذاتي × التعجيل الزاوي

مثال 2 (ج)

القانون الثاني لنيوتن في حالة الدوران

المسألة

يقوم طالبٌ برشقِ سهم باتجاه لوحة وذلك بتدوير ساعده حول مرفقه في دائرة رأسية. يبلغ عزم القصور الذاتي للساعد والسهم حول نقطة محور الدوران $0.075\ kg{\cdot}m^2$، في حين أن طول الساعد $0.26\ m$. إذا كان التعجيل المماسي للسهم عند انطلاقه $45\ m/s^2$، فكم تكون محصّلة العزوم المؤثرة في الساعد والسهم؟

الحلّ

المعطى: $I = 0.075\ kg{\cdot}m^2$ $\quad a = 45\ m/s^2$ $\quad d = 0.26\ m$

المجهول: $\tau = ?$

أستعملُ معادلةَ القانون الثاني لنيوتن في حالة الدوران.

$\tau = I\alpha$ حيث $\alpha = \dfrac{a}{d}$

$$\tau = I\left(\frac{a}{d}\right)$$

$$\tau = (0.075\ kg{\cdot}m^2)\left(\frac{45\ m/s^2}{0.26\ m}\right)$$

$$\boxed{\tau = 13\ N{\cdot}m}$$

تطبيق 2 (ج)

القانون الثاني لنيوتن في حالة الدوران

1. دولابُ خزاف على شكل قرص نصفُ قطره $0.50\ m$ وكتلته $100.0\ kg$ يدور حول محورِه بسرعة زاويّة $50.0\ rev/min$. يستطيع الخَزّاف إيقاف الدولاب بإلصاق قطعة مبلّلة بحافته لمدة $6.0\ s$.
   أ. ما التعجيلُ الزاويُّ للدولاب؟
   ب. ما مقدارُ العزمِ الذي طبَّقه الخَزاف على الدولاب؟
2. دولاب درّاجة هوائية نصف قطره $0.33\ m$ وكتلته $1.5\ kg$ يدورُ بسرعة زاويّة $98.7\ rad/s$. ما العزمُ المطلوب لإيقافِ دورانِ الدولابِ خلال $2.0\ s$؟ (يعتبر الدولاب كحلقة).

الزخمُ الزاوي

هل قمّت يومًا بتحريكِ أطفالٍ في دوّامةٍ دائرية؟ ربّما لاحظْت عندَها أنك تحتاجُ إلى جهدٍ لتدويرِ الدوّامة، وكذلك إلى جهدٍ آخر لإيقافِها عن الدوران. فالأجسامُ تحاولُ ممانعةَ أي تغييرٍ في حركتِها الدائريةِ كما تحاولُ ممانعة أي تغييرٍ في حركتِها الانتقالية.

للأجسامِ الدوّارةِ زخمٌ زاوي

بما أن للأجسامِ الدوّارةِ عزمُ قصور ذاتي، فإن لها زخمًا نتيجة دورانها. يُسمّى هذا الزخم **بالزخم الزاوي** angular momentum، ويعرّفُ بالمعادلةِ التالية:

الزخمُ الزاوي

حاصلُ ضربِ عزم القصورِ الذاتي لجسمٍ حولَ محورِ الدورانِ في سرعتِه الزاويّة حولَ المحورِ نفسه.



الزخم الزاوي

$$L = I\omega$$

الزخم الزاوي = عزم القصور الذاتي × السرعة الزاويّة

وتكونُ وحدةُ قياسِ الزخمِ الزاوي $kg{\cdot}m^2/s$. لتكوينِ فكرة عن كِبَرِ هذه الوحدة، لاحظْ أن كرةَ بولينغ كتلتها 35 kg تدور بسرعة زاويّة 40 rad/s يكونُ لها زخم زاوي مقدارُه $80\ kg{\cdot}m^2/s$. يلخّص **الجدول 2-4** العلاقة بين الكميات الانتقالية والكميّات الدورانية.

الجدول 2-4 الزخم الانتقالي (الخطّي) والزخم الزاوي

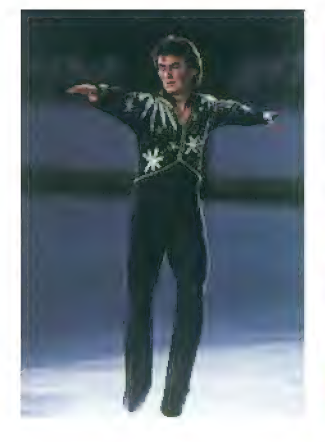
الإنتقال	$p = mv$	الزخم الخطي = الكتلة × السرعة الخطية
الدوران	$L = I\omega$	الزخم الزاوي = عزم القصور الذاتي × السرعة الزاوية

يمكنُ للزخمِ الزاويّ أن يكونَ محفوظًا

عندما تكونُ محصِّلةُ العزومِ المؤثّرةِ في جسم صفرًا، يبقى الزخم الزاوي على حاله ولا يتغيّر. يسمى هذا القانون *حفظ الزخم الزاوي*.

فمثلاً إذا كان الاحتكاك بين المزلاجين والثلج مهملاً، يكون العزم المؤثّر على المتزلّج في **الشكل 2-11**، صفرًا. وبذلك يكون زخمه الزاوي محفوظًا. عندما يقرِّب المتزلِّج يديه ورجليه باتجاه جسمه، يصبح جزء أكبر من كتلته أقرب إلى محورِ الدوران، وبذلك يقلُّ عزمُ قصورِه الذاتي حولَ محورِ دورانه. ولأن زخمَه الزاويّ يبقى محفوظًا، فإن سرعتَه الزاويّة يجبُ أن تزدادَ لكي تعوِّضَ النقصَ الحاصل في عزمِ القصورِ الذاتي.





الشكل 2-11

يبقى الزخمُ الزاويُّ للمتزلّجِ محفوظًا عندما يقرّب المتزلج يديه الممدودتيْن نحو جسمه.

مثال 2 (د)

حفظ الزخم الزاوي

المسألة

تقوم فتاة كتلتها $65\ kg$ بتدوير دوّامة كتلتها $5.25 \times 10^2\ kg$ ونصف قطرها $2.00\ m$. تسير الفتاة من نقطة على حافة الدوّامة باتجاه مركزها. إذا كانت السرعة الزاويّة الابتدائية للدوامة $0.20\ rad/s$، فكم ستصبح هذه السرعة عندما تكون الفتاة على بعد $0.50\ m$ من المركز؟

الحـــلّ

1. أعرف

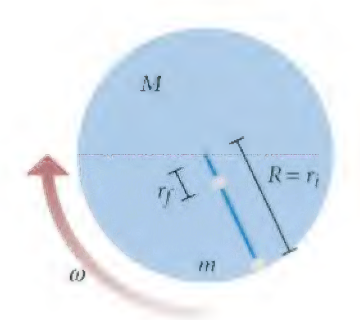
المعطى:

$M = 5.25 \times 10^2\ kg$ $\quad r_i = R = 2.00\ m$ $\quad r_f = 0.50\ m$

$m = 65\ kg$ $\quad \omega_i = 0.20\ rad/s$

المجهول: $\omega_f = ?$

الرسم:



2. أخطط

أختار معادلة أو موقفًا: لأن العزم الخارجي الذي يؤثّر في نظام الدوّامة - الفتاة يكون صفرًا، لذلك يبقى الزخم الزاوي لهذا النظام محفوظًا.

$$L_i = L_f$$

$$L_{m,i} + L_{s,i} = L_{m,f} + L_{s,f}$$

أحسب عزم القصور الذاتي، وأفترض أن الدوّامة عبارة عن قرص صلب، وأن الفتاة كتلة نقطية.

$$I_m = \frac{1}{2} MR^2$$

$$I_{s,i} = mR^2$$

$$I_{s,f} = mr_f^2$$

3. أحسب

أعوّض القيم في المعادلات وأحل: أحدّد عزم القصور الذاتي الابتدائي I_m و $I_{s,i}$، والزخم الزاوي الابتدائي L_i.

$$I_m = \left(\frac{1}{2}\right)(5.25 \times 10^2\ kg)(2.00\ m)^2 = 1.05 \times 10^3\ kg{\bullet}m^2$$

$$I_{s,i} = (65\ kg)(2.00\ m)^2 = 260\ kg{\bullet}m^2$$

$$L_i = L_{m,i} + L_{s,i} = I_m\omega_i + I_{s,i}\omega_i$$

$$L_i = (1.05 \times 10^3\ \text{kg•m}^2)(0.20\ \text{rad/s}) + (260\ \text{kg•m}^2)(0.20\ \text{rad/s})$$

$$L_i = 260\ \text{kg•m}^2\text{/s}$$

أحدِّد عزم القصور الذاتي النهائي $I_{s,f}$ والزخم الزاوي النهائي L_f.

$$I_{s,f} = (65\ \text{kg})(0.50\ \text{m})^2 = 16\ \text{kg•m}^2$$

$$L_f = L_{m,f} + L_{s,f} = I_m\omega_f + I_{s,f}\,\omega_f$$

$$L_f = (1.05 \times 10^3\ \text{kg•m}^2 + 16\ \text{kg•m}^2)\omega_f$$

$$L_f = (1.07 \times 10^3\ \text{kg • m}^2)\omega_f$$

أساوي بين الزخم الزاوي الابتدائي والزخم الزاوي النهائي.

$$260\ \text{kg•m}^2\text{/s} = (1.07 \times 10^3\ \text{kg•m}^2)\omega_f$$

$$\boxed{\omega_f = 0.24\ \text{rad/s}}$$

4. أقيم بما أنّ عزم القصور الذاتي ينقص نتيجة لاقتراب الفتاة من مركز الدوّامة، فإن السرعة الزاويّة النهائية تكون أكبر من السرعة الزاويّة الابتدائية.

$$0.24\ \text{rad/s} > 0.20\ \text{rad/s}$$

تطبيق 2 (د)

حفظ الزخم الزاوي

1. دولاب دراجة هوائية كتلتها 2.0 kg ونصف قطرها 0.30 m تدور بسرعة زاويّة 25 rad/s عند وجود كتلة 0.30 kg على مسافة 0.19 m من محور دورانها. كم تصبح السرعة الدورانية للحلقة إذا ابتعدت الكتلة إلى مسافة 0.25 m من محور الدوران؟

2. أسطوانة صلبة وشاقولية كتلتها 10.0 kg ونصف قطرها 1.00 m تدور بسرعة زاويّة 7.00 rad/s حول محورها. أُلقيت قطعة من المعجون كتلتها 0.250 kg شاقوليًّا على الأسطوانة وعلى مسافة 0.900 m من محورها والتصقت بها. احسب السرعة الزاويّة النهائية للأسطوانة.

الطاقة الحركية الدورانية

درست في الصف الحادي عشر أن الطاقة الميكانيكية لجسم تشتمل على الطاقة الحركية الانتقالية والطاقة الكامنة، إلاّ أن ذلك كان صحيحًا عندما تعاملنا مع الجسم ككتلة نقطيّة. أي أن هذا النموذج المبسَّط لم يأخذ في الحسبان إمكانية الحركة الدورانية لجسم حول نفسه بالإضافة إلى حركته الانتقالية ككتلة نقطية.

الأجسام التي تدور حول نفسها لها طاقة حركية دورانية

للأجسام التي تدور حول نفسها طاقة حركية مرتبطة بسرعتها الزاويّة. يسمّى هذا النوع من الطاقة **الطاقة الحركية الدورانية** rotational kinetic energy وتُعطى بالعلاقة التالية:

الطاقة الحركية الدورانية

طاقة الجسم الناتجة عن دورانه.

الطاقة الحركية الدورانية

$$KE_{\text{دوران}} = \frac{1}{2} I\omega^2$$

الطاقة الحركية الدورانية = $\frac{1}{2}$ × عزم القصور الذاتي × مربَّع السرعة الزاوية

والطاقة الحركية الانتقالية لجسيم مماثلة لتعبير $\frac{1}{2} mv^2$، حيث يحلّ عزم القصور الذاتي محلّ الكتلة، والسرعة الزاويّة محل السرعة الانتقالية. إن وحدة قياس الطاقة الحركية الدورانية في نظام SI هي joule. يلخص **الجدول 5-2** العلاقة بين الطاقة الحركية الانتقالية وكمّيات الطاقة الحركية الدورانية.

الجدول 5-2 الطاقة الحركية الانتقالية والطاقة الحركية الدورانية

الانتقال	$KE_{\text{انتقال}} = \frac{1}{2} mv^2$	الطاقة الحركية الانتقالية = $\frac{1}{2}$ الكتلة × مربع السرعة
الدوران	$KE_{\text{دوران}} = \frac{1}{2} I\omega^2$	الطاقة الحركية الدورانية = $\frac{1}{2}$ عزم القصور الذاتي × مربع السرعة الزاويّة

الطاقة الميكانيكية يمكن أن تكون محفوظة

تذكر السباق بين الكرة الصلدة والأسطوانة الصلبة والأسطوانة المجوّفة في القسم الأول من هذا الفصل، لأننا افترضنا أن القوّة الوحيدة التي تبذل شغلاً في تحريك الكرات والأسطوانات هي أوزانها فقط. لذلك تكون الطاقة الميكانيكية لكل من هذه الأجسام محفوظة. وخلافًا لحالة الأجسام في فصل الشغل والطاقة في الصف الحادي عشر، فإن الأجسام هنا تدور. تذكّر أن الطاقة الميكانيكية هي حاصل جمع كل أنواع الطاقات الحركية والكامنة، لذلك يجب علينا إضافة تعبير الطاقة الحركية الدورانية في معادلة الطاقة الميكانيكية كما يلي:

$$ME = KE_{\text{انتقال}} + KE_{\text{دوران}} + PE_g$$

$$ME = \frac{1}{2} mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2 + mgh$$

مثال 2 (هـ)

حفظ الطاقة الميكانيكية

المسألة

كرة صلدة كتلتها 4.10 kg ونصف قطرها 0.050 m تبدأ بالتدحرج من السكون من ارتفاع 2.00 m على منحدر مائل بزاوية 30.0° فوق الأفقي. ما السرعة الانتقالية لمركز الكرة عند وصولها إلى أسفل المنحدر؟



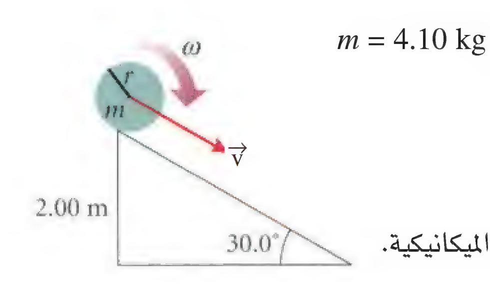
1. أعرف

المعطى: $h = 2.00\ \text{m}$ $\quad \theta = 30.0^\circ$ $\quad m = 4.10\ \text{kg}$

$r = 0.050\ \text{m}$ $\quad v_i = 0.0\ \text{m/s}$

المجهول: $v_f = ?$

الرسم:



2. أخطط

أختار معادلة أو موقفًا: أطبّق مبدأ حفظ الطاقة الميكانيكية.

$$ME_i = ME_f$$

في الحالة الابتدائية، يكون للجسم طاقة كامنة جذبية فقط. عند الوصول إلى أسفل المنحدر، تتحوّل الطاقة الكامنة الجذبية إلى طاقة حركيه انتقالية ودورانية.

$$mgh = \frac{1}{2}mv_f^2 + \frac{1}{2}I\omega_f^2 \qquad \text{حيث} \qquad \omega_f = \frac{v_f}{r}$$

عزم القصور الذاتي للكرة الصلدة: $I = \frac{2}{5}mr^2$

بما أن الطاقة الميكانيكية الابتدائية تساوي الطاقة الميكانيكية النهائية لذلك:

$$mgh = \frac{1}{2}mv_f^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{2}{5}mr^2\right)\left(\frac{v_f}{r}\right)^2 = \frac{1}{2}mv_f^2 + \frac{1}{5}mv_f^2 = \frac{7}{10}mv_f^2$$

أعيد ترتيب المعادلة وأعزل المجهول:

$$v_f^2 = \frac{10}{7}gh$$

3. أحسب

أعوّض القيم في المعادلة وأحل:

$$v_f^2 = \frac{10}{7}(9.81\ \text{m/s}^2)(2.00\ \text{m})$$

$$\boxed{v_f = 5.29\ \text{m/s}}$$

4. أقيّم

يجب أن تكون السرعة النهائية أقل من تلك التي يكتسبها جسم يسقط سقوطًا حرًّا من الارتفاع نفسه، لأن جزءًا من الطاقة الابتدائية يتحوّل إلى طاقة دورانية.

$$v_{f\ \text{السقوط الحر}} = \sqrt{2gh} = 6.26\ \text{m/s}$$

$$5.29\ \text{m/s} < 6.26\ \text{m/s}$$

تطبيق 2 (هـ)

حفظ الطاقة الميكانيكية

1. دولاب درّاجة هوائية كتلته 1.5 kg ونصف قطره 0.33 m يبدأ بالتدحرج من السكون من أعلى تلّة ارتفاعها 14.8 m. ما السرعة الانتقالية لمركز الدولاب عند وصوله إلى أسفل التلّة؟ (افترض أن الدولاب عبارة عن حلقة حيث $I = mr^2$).
2. افترض كرة سلّة قطرها 25 cm عبارة عن قشرة كروية. كم من الزمن يلزم الكرة بدءًا من السكون، لكي تتدحرج مسافة 4.0 m على منحدر مائل بزاوية 30.0^o مع الأفقي؟

مراجعةُ القسم 2-3

1. يحمل طالب كتلة 3.0 kg في كل من يديه أثناء جلوسه على كرسي دوّار. عند مّد يديه أفقيًّا تكون كل كتلة على بُعد 1.0 m من محور الدوران، وتكون السرعة الزاويّة 0.75 rad/s. إذا قَرَّب الطالب الكتلتين إلى مسافة 0.30 m من محور الدوران، فكم تصبح السرعة الدورانية الجديدة؟ افترض أن عزم القصور الذاتي للطالب والكرسي حول محور الدوران هو $3.0\ kg \cdot m^2$.
2. **الفيزياءُ في الحياة اليوميّة :** يطبّق راكب درّاجة قوّة مقدارها 40.0 N على دواستها التي تبعد مسافة 0.15 m عن محور دوران الدولاب الذي يبلغ نصف قطره 50.0 cm. إذا بلغت السرعة الانتقالية للدرّاجة 2.25 m/s بعد 3.0 s من بدء الحركة من السكون، فكم يكون عزم القصور الذاتي للدولاب؟ (أهمل الاحتكاك وعزم القصور الذاتي للدولاب الآخر.)





المقذوفاتُ والأقمارُ الاصطناعية

كما ذكرنا في كتابِ الصفِّ الحادي عشر، عندما تُقذفُ كرةٌ بسرعةٍ ابتدائيةٍ موازيةٍ لسطحِ الأرضِ يكونُ لحركتِها مركّبتان: سرعةٌ أفقيةٌ ثابتة، وتعجيل رأسي مساوٍ لتعجيل السقوطِ الحرّ.

في ضوءِ هذا التحليل يصعبُ فهمُ دورانِ القمرِ وباقي الأقمارِ الاصطناعيةِ حول الأرضِ على أنها حركةُ مقذوفات. لكنَّ الأقمارَ الاصطناعيةِ هي فعلاً مقذوفات. كما يظهرُ في **الشكل 12-2** كلما كانت سرعةُ المقذوفِ الابتدائيةُ الموازيةُ للأرضِ أكبر، قطعَ المقذوفُ مسافةً أفقيةً أطولَ قبل ارتطامِهِ بالأرض. لاحظِ الآتي: عند وصول المقذوفِ إلى سرعةٍ ابتدائيةٍ معيّنة، يعودُ إلى نقطةِ انطلاقِهِ دون أن يقتربَ من الأرض. تكونُ قوةُ الجاذبية، في هذه الحالة، من الكِبرِ بحيثُ تمنعُ المقذوفَ من متابعةِ سيرِهِ في الخطِّ المستقيمِ الابتدائي وتمكّنُهُ من البقاءِ في مدارِه.

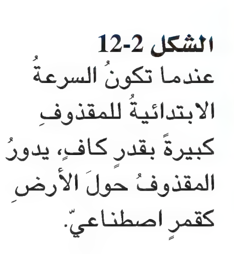
سرعةُ الإفلات Escape velocity

عندما يكونُ مقدارُ سرعةِ جسمٍ أو مركبةٍ فضائيةٍ أكبرَ من السرعةِ اللازمةِ لوضعِه في مدارٍ معيّن، يمكنُ للجسمِ أن يفلتَ من شدِّ الجاذبيةِ الأرضيةِ ويهيمَ في الفضاء. يحدثُ ذلك عندما تمكّنُهُ سرعتُهُ الابتدائيةُ من تخطّي مجالِ تأثيرِ قوةِ الجاذبية. وتكونُ القيمةُ الرياضيةُ لسرعةِ الإفلاتِ هذه:

$$v_{\text{إفلات}} = \sqrt{\frac{2MG}{R}}$$

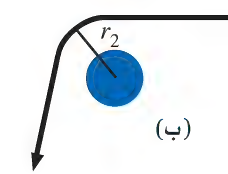
حيثُ R نصفُ قطرِ الكرةِ الأرضية ($R = 6.37 \times 10^6$ m) و M كتلتها ($M = 5.98 \times 10^{24}$ kg). لذلك تكونُ سرعةُ الإفلاتِ لمقذوفٍ من مجالِ الجاذبيةِ الأرضيةِ $v_{\text{إفلات}} = 1.12 \times 10^4$ m/s، وهي سرعةٌ لا تَعتمِدُ على كتلةِ المقذوف.

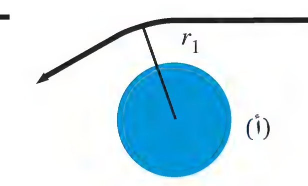
كلما ازدادتْ كتلةُ كوكبٍ ما ونقصَ نصفُ قطره، ازدادَ مقدارُ سرعةِ الإفلاتِ من مجالِ جاذبيةِ هذا الكوكب، كما هو موضحٌ في **الشكل 13-2**. إذا كان للكوكبِ كتلةٌ كبيرةٌ جدًّا ونصفُ قطرٍ صغيرٌ، يصلُ مقدارُ سرعةِ الإفلاتِ من جاذبيتِهِ إلى قيمٍ كبيرةٍ جدًّا.



الشكل 12-2
عندما تكونُ السرعةُ الابتدائيةُ للمقذوفِ كبيرةً بقدرٍ كافٍ، يدورُ المقذوفُ حولَ الأرضِ كقمرٍ اصطناعيّ.

مثلاً، إذا كانت كتلةُ جسمٍ معيَّنٍ ثلاثةَ أضعافِ كتلةِ الشمس، وقطرُهُ لا يتجاوزُ 10 km، فإن سرعةَ الإفلاتِ من جاذبيتِهِ تبلغُ سرعةَ الضوء، ما يعني أن قوةَ جاذبيةِ هذا الجسمِ على أيِّ مقذوفٍ ستكونُ كبيرةً جدًّا بحيثُ لا تمكِّنُهُ حتى سرعةُ الضوءِ من الإفلاتِ من تلك الجاذبية.





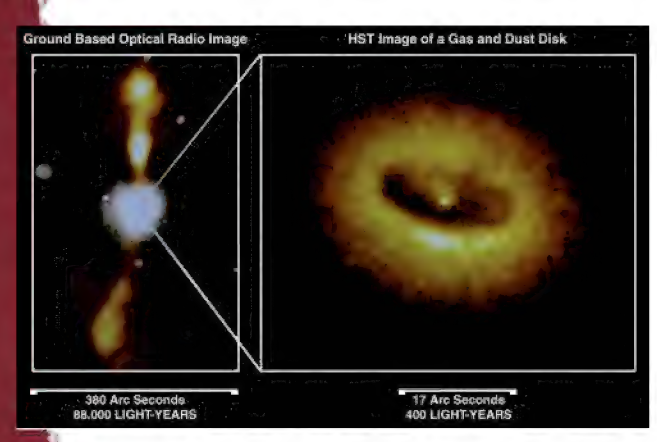
R_S
(ج)

الشكل 2-13

(أ) المقذوفُ الذي يمرُّ بالقربِ من جسمٍ كتلتهُ كبيرةٌ ينحرفُ عن مساره.
(ب) كلما صَغُرَ حجمُ الجسم انحرفَ المقذوفُ أكثرَ عن مسارهِ وازدادت سرعةُ الإفلاتِ من مجالِ جاذبيتِه.
(ج) إذا كان الجسمُ صغيرًا جدًّا وكتلتهُ كبيرةً جدًّا تكونُ سرعةُ الإفلاتِ من جاذبيتِه، عند مسافةِ R_S، أكبرَ من سرعةِ الضوء، عندئذٍ يُسمّى الجسمُ ثقبًا أسود.

الثقوبُ السوداء black holes

كان العالِمُ كارل أوّلَ من تنبأَ بوجودِ أجسامٍ كهذه، كبيرةِ الكتلةِ صغيرةِ الحجم. كان ذلك في سويسرا عامَ 1916 عندما استخدمَ حلولَهُ لمعادلاتِ آينشتاين للنسبيةِ العامة، وذلك بقصدِ التنبؤِ بخصائصِ تلك الأجسام. إن المسافةَ من مركزِ الجسمِ إلى المدارِ الدائريِّ، الذي تكونُ عنده سرعةُ الإفلاتِ مساويةً لسرعةِ الضوء، يُسمّى نصفَ قطرِ Schwarzchild (R_S). والضوءُ لا يمكنُ أن ينفُذَ من أيِّ نقطةٍ في كرة Schwarzchild، ولا يمكنُنا الحصولُ على أيِّ معلوماتٍ عن أيِّ حوادثَ تقعُ ضمنَها. يُسمّى طرفُ الدائرةِ «أفق الأحداث»، وتُسمّى المنطقةُ المظلمةُ من الكرة «الثقبَ الأسود».



الشكل 2-14

الشهبُ الغازيةُ والقرصُ المركزيُّ إلى اليمين، الناتجان من دمجِ صورةٍ ضوئية مع صورةِ راديو تلسكوبية لـ NGC 4261، يظهران ما يدلُّ على وجودِ ثقبٍ أسودَ في مركزِ هذه المجرّة.

أعطتِ التجاربُ مؤخرًا أدلّةً قويةً على وجودِ الثقوبِ السوداء. فقد تمتْ ملاحظةُ كمياتٍ كبيرةٍ من أشعةِ X وإشعاعاتٍ أخرى قادمةٍ من مناطقَ قريبةٍ من نجومٍ مرئية والنجومُ ليست مصدرَ هذه الإشعاعات. إذا كان للنجمِ ثقبٌ أسودُ يرافقُه، يمكنُ للنجمِ أن يخسرَ بعضَ فضائِهِ الخارجيِّ الذي ينجذبُ إلى الثقب، وتكونُ هذه الغازاتُ الفضائيةُ مصدرَ تلك الإشعاعاتِ لدى تعجيلِها بالقربِ من الثقب. من أنواعِ الثقوبِ السوداءِ المهمةِ هي Scorpius X-1 و Cygnus X-1.

إن الكميةَ الهائلةَ من الطاقةِ التي تُصدرُها بعضُ المراكزِ في المجرةِ تدفعُ معظمَ الفلكيينَ إلى الاعتقادِ بأن مصدرَ هذه الطاقةِ ثقوبٌ سوداءُ هائلة.

من المحتمَلِ أن يكونَ للمجرةِ NGC 4261 الموضحةِ في **الشكل 2-14** ثُقْبٌ أسودُ عند مركزِها. إن بعضَ علماءِ الفضاءِ يعتقدونَ أن لمجرتِنا، دربِ التبانة، ثقبًا أسودَ بحجمِ مجموعتِنا الشمسية.

ملخّصُ الفصل 2

مصطلحاتٌ أساسية

- العزم (ص 33) Torque
- ذراعُ الدوران (ص 33) Lever arm
- مركزُ الكتلة (ص 37) Center of mass
- عزمُ القصورِ الذاتيّ (ص 38) Moment of inertia
- الزخم الزاويّ (ص 46) Angular momentum
- الطاقة الحركية الدورانيّة (ص 49) Rotational kinetic energy

أفكارٌ أساسية

القسمُ 2-1 العزم

- العزم مقياس قابلية القوة لإحداث دوران لجسم حول محور.
- العزم على جسمٍ معيّنٍ يعتمدُ على مقدارِ القوّةِ المؤثرةِ وعلى طولِ ذراعِ الدورانِ وفقًا للمعادلة التاليةِ: $\tau = Fd\,(\sin\theta)$

القسمُ 2-2 الدورانُ والقصورِ الذاتيُّ

- إن عزم القصور الذاتي لجسمٍ هو مقياسٌ لمقاومةِ الجسم للتغيّرِ في حركتهِ الدورانيّة حولَ محورٍ معيّن.
- لكي يكونَ جسمٌ ذو أبعادٍ في حالةِ اتزانٍ تامّ، يجب أن يحقّقَ الاتزانَ الانتقاليَّ والاتزانَ الدورانيّ.

القسمُ 2-3 ديناميكا الدوران

- قانون الحركة الدورانية الذي يكافئ القانون الثاني لنيوتن يمكن كتابته على الشكل: $\tau = I\alpha$
- للأجسام الدوّارة زخم زاويّ، يكون محفوظًا في غياب العزوم الخارجية.
- للأجسام الدوّارة طاقة حركية دورانية، تكون محفوظة في غياب العزوم الخارجية.

رموزُ المتغيّرات

الكمية	الوحدة
τ العزم	N•m
I عزمُ القصورِ الذاتيّ	$kg{\bullet}m^2$
L الزخم الزاويّ	$kg{\bullet}m^2/s$
$KE_{\text{الدوران}}$ الطاقة الحركية الدورانية	J

مراجعةُ الفصل 2



راجعْ وقيِّمْ

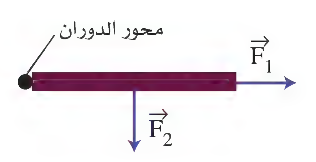


العزمُ

أسئلةٌ حول المفاهيم

1. اشرحْ كيف يستعملُ طبيبُ الأسنانِ العزمَ لتقويمِ الأسنان.

2. أيٌّ من القوتينِ المؤثرتينِ في القضيب، في **الشكل 15-2**، تُنتِجُ عزمًا حول المحورِ الواقعِ عند طرفِ القضيبِ الأيسر؟

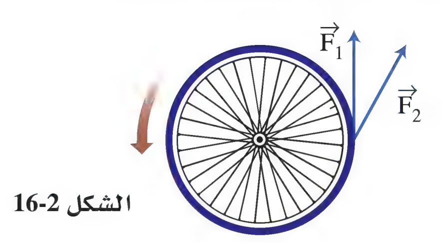


الشكل 15-2

3. يدحرجُ ولدانِ دواليبَ سيّارةٍ على منحدر. يعتقدُ أحدُهما أنَ الدولابَ يدورُ بشكلٍ أسرع لو حشر أحدهما نفسه داخل الدولاب بينما يعتقدُ الثاني أن ذلك يؤدي إلى دورانٍ أبطأ. أيُّ الاعتقادين صحيحٌ؟

4. لا يمكنُ لعزمِ القصورِ الذاتيِّ لجسمٍ منتظمٍ حول محور يمر في مركز كتلته أن يتخطّى القيمةَ MR^2، حيث M هي الكتلةُ و R بعدُ مركزِ الكتلةِ عن أقصى أطراف الجسم. ما سببُ ذلك؟ (ملاحظة: أيُّ الأجسامِ يكونُ عزمُ قصورِهِ الذاتيِّ MR^2؟)

5. تؤثِّرُ قوّتانِ لهما المقدارُ نفسُه في دولاب، كما في **الشكل 16-2**. أيُّهما تطبّقُ عزمًا أكبرَ على الدولاب؟



الشكل 16-2

6. تؤثِّرُ قوّتانِ لهما المقدارُ نفسُهُ واتجاهانِ متعاكسان، في النقطةِ نفسِها من جسمٍ معيَّن، هل يمكنُ لهما إنتاجُ محصّلةِ عزومٍ على الجسم؟ اشرحْ.

7. جلوسُكَ وأنتَ في وضعيَّةِ الاستلقاءِ على الظهرِ ويداكَ خلفَ رأسِك، أصعبُ من جلوسِكَ وأنتَ في وضعيَّةِ الاستلقاءِ على الظهرِ ويداكَ ممدودتانِ أمامَكَ، برِّرْ رأيَك.

مسائلُ تطبيقية

8. دلوٌ مملوءة بالماء، كتلتُها 54 kg، تتدلّى من حبل ملفوفٍ حول أسطوانةٍ متزنةٍ نصفُ قطرِها 0.050 m. إذا كانت الأسطوانةُ في حالةِ السكون والدلوُ تتدلى من الحبل، فما مقدارُ العزمِ الذي تنتِجُهُ الدلوُ حول مركزِ الأسطوانة؟

9. يبلغُ طولُ ذراعِ رافعةٍ في موقعِ منشآتٍ 15.0 m، والزاويةُ بين الذراعِ وبين الأفقيِّ 20.0°. افترضْ أن أقصى وزنٍ يمكنُ رفعُهُ بالرافعةِ يحدَّدُ بالعزمِ الذي يطبّقهُ هذا الوزنُ حول قاعدةِ ذراعِ الرافعة.

أ. ما مقدارُ أقصى عزمٍ يمكنُ للرافعةِ أن تتحملَهُ إذا كان أقصى وزنٍ معلّقٍ بها 450 N؟

ب. ما أقصى وزنٍ يُعلَّقُ بهذه الرافعةِ إذا كانتِ الزاويةُ بينها وبين الأفقيِّ 40.0°؟

الدوران والقصور الذاتي

أسئلةُ مراجعة

10. يلعبُ مهرِّجٌ في مدينةِ ألعابٍ بعصوينِ يغزلُهما في الهواء، إحداهما أثقلُ من الأخرى. أيُّ النصوصِ التالية تعتبرُ صحيحة؟

أ. العصا الخفيفةُ لها عزمُ قصورٍ ذاتيٍّ أكبر.

ب. يتحرّكُ كلٌّ من طرفَي العصوينِ على مسارِ قطعٍ مكافئٍ بعد قذفِهما في الهواء.

ج. يتحرّكُ مركزُ كتلةِ كلٍّ من العصوينِ على قطعٍ مكافئٍ بعد قذفِهما.

11. عندما يقفُ المهرج، في السؤالِ السابق، مستويًا ويحمِلُ العصوينِ من طرفيهما على امتدادِ يديه، أين يكونُ مركزُ كتلتِه؟

أ. في وسطِ جسمِه بالضبط.

ب. أقربَ إلى اليدِ التي تمسِكُ بالعصا الخفيفة.

ج. أقربُ إلى اليدِ التي تمسِكُ بالعصا الثقيلة.

12. ما شرطا الاتزان؟ اشرحْ تطبيقَهما في حالةِ ولدينِ يجلسانِ على طرفَيِّ أرجوحة.

13. ما الشرطُ الذي يجبُ أن يتحقَّقَ لسرعةِ جسمٍ يسيرُ وهو في حالةِ اتزان؟

14. يرمي لاعبٌ عصًا في الهواء.

أ. صِفْ حركةَ طرفَيِ العصا وهي تتحرَّكُ في الهواء.

ب. صِفْ حركةَ مركزِ كتلةِ العصا.

أسئلةٌ حول المفاهيم

15. انطلقَ مقذوفٌ في الهواء ثم انفجرَ فجأةً إلى قِطَعٍ متعددة. ماذا يُقال بعد الانفجار، حولَ حركةِ مركز كتلة القِطَعِ المتطايرة؟

16. هل يمكنُكَ أن توازنَ بين جسمينِ لهما كتلتانِ مختلفتانِ (وبالتالي وزنانِ مختلفان) باستعمالِ ميزانٍ بسيطٍ ذي كفَّتين؟ اشرحْ.

17. يسيرُ جسيمٌ في خطٍّ مستقيم، ويكونُ العزمُ المؤثرُ فيه صفرًا حول نقطةٍ غيرِ محدَّدة. هل يعني ذلك بالضرورةِ أن محصِّلةَ القوى المؤثِّرةِ في الجسيمِ هي صفر؟ هل يمكنُكَ القولُ إن السرعةَ الزاويّةَ للجسيمِ ثابتة؟ اشرحْ.

مسائلُ تطبيقية

18. يقفُ منظِّفُ زجاجٍ على منصَّةٍ تتدلّى بحبلَينِ رأسيَّينِ مربوطينِ بطرفيها. تزنُ المنصةُ 205 N ويبلغُ طولُها 3.00 m. ما القوةُ التي يطبِّقها كلُّ حبلٍ على المنصّةِ إذا كان وزنُ المنظِّفِ 675 N وكان يقفُ على مسافةِ 1.00 m من أحدِ طرفَيْها؟

قانون نيوتن للحركة الدوارنية

أسئلةٌ حول المفاهيم

19. يدور جسم بسرعة زاويّة ثابتة. هل هناك محصِّلة عزوم تؤثِّر فيه؟ اشرح ذلك.

20. إذا كان جسم في حالة الاتزان، هل يعني ذلك عدم وجود عزوم مؤثِّرة فيه؟

21. تتدحرج أسطوانتان لهما نصف القطر نفسه من دون انزلاق على منحدر مائل. كتلة الأسطوانة الأولى هي ضعفا كتلة الأسطوانة الثانية. ما مقدار العزم المؤثّر في الأسطوانة الأولى مقارنة مع العزم المؤثّر في الأسطوانة الثانية؟

مسائلُ تطبيقية

22. أسطوانة صلبة ومنتظمة تبلغ كتلتها 30.0 kg ونصف قطرها 0.180 m. إذا كان التعجيل الزاوي للأسطوانة حول محورها 2.30×10^{-2} rad/s^2، فكم يكون العزم المؤثّر في الأسطوانة؟

23. تم تدوير دوامة دائرية أفقية كتلتها 350 kg ونصف قطرها 1.5 m وذلك بشد حبل مربوط حول حافتها. كم يجب أن يكون العزم اللازم لتدوير الدوامة من السكون وتحقيق سرعة زاوية 3.14 rad/s خلال 2.00 s؟

الزخم الزاوي والطاقة الحركية الدورانية

أسئلةُ مراجعة

24. هل يكون الزخم الزاويّ محفوظًا دائمًا؟ اشرح ذلك.

25. هل يمكن لجسمين لهما الكتلة نفسها والسرعة الزاويّة نفسها أن يكون لهما زخمان زاويّان مختلفان؟ اشرح ذلك.

26. يسير طفل على دوامة أثناء دورانها من نقطة قريبة من محور الدوران إلى الحافة الخارجية للدوامة. كيف يؤثّر ذلك في السرعة الدورانية للدوّامة؟ اشرح ذلك.

27. هل يمكن لمتزلّج على الجليد أن يغيّر من سرعته الزاوية دون تطبيق أي عزم خارجي؟ اشرح ذلك.

أسئلةٌ حول المفاهيم

28. يستعمل المتزلّجون على الجليد مبدأ حفظ الزخم الزاوي للحصول على سرعة غَزْل دورانية عالية، وذلك بضمّ سواعدهم نحو محور الدوران. افترض أن أحد المتزلجين ضمَّ ساعدَيْه نحو صدره فقلّص عزم قصوره الذاتي إلى النصف، وضاعف سرعته الزاويّة. عند دراستنا للطاقة

الحركية الدورانية للمتزلج في هذه الحالة نرى أنها قد تضاعفت مع أن الزخم الزاوي بقي محفوظًا. من أين حصل المتزلج على الطاقة الحركية الدورانية الإضافية؟

29. تبدأ كرة صلدة كتلتها 2.0 kg ونصف قطرها 0.50 m بالتدحرج من ارتفاع 3.0 m على منحدر يميل بزاوية 20° مع الأفقي. كما يبدأ بالتدحرج مع الكرة حلقة صلبة وقرص صلب لكل منهما الكتلة نفسها ونصف القطر نفسه كما للكرة. أي من الأجسام الثلاثة يصل أولاً إلى أسفل المنحدر إذا تم التدحرج من دون انزلاق؟

مسائلُ تطبيقية

30. تبدأ كرة بولينغ كتلتها 35 kg ونصف قطرها 13 cm بالتدحرج من السكون من أعلى منحدر عند ارتفاع 3.5 m. احسب السرعة الانتقالية لمركز الكرة عند وصولها إلى أسفل المنحدر.

31. كرة صلدة وزنها 240 N ونصف قطرها 0.20 m تتدحرج مسافة 6.0 m على منحدر يميل بزاوية 37° مع الأفقي. إذا بدأت الكرة حركتها من السكون عند أعلى المنحدر، فكم تكون سرعة دورانها الزاويّة عند وصولها إلى أسفل المنحدر؟

مراجعةٌ عامّة

32. افترض وجودَ كرتينِ لهما نصفُ القطرِ نفسُه والكتلةُ ذاتُها، إحداهما مجوّفةٌ والأخرى صلدة. بأيِّ طريقةٍ تستطيعُ التمييزَ بينهما؟
أ. بدحرجتِهما على منحدر.
ب. برميِهما من الارتفاعِ نفسِه.
ج. بوزنِهما بالميزان.

33. رُبطَت دلو ماء كتلتها 75 kg بحبل ثم لُفّ الطرف الثاني للحبل حول أسطوانة أفقية ثابتة نصف قطرها 0.075 m. يمكن تدوير الأسطوانة بوساطة ذراع طوله 0.25 m مثبت بطرفها. ما أقلّ قوّة يمكن تطبيقها بشكل عمودي على قبضة الذراع بحيث تستطيع رفع دلو الماء بسرعة ثابتة؟

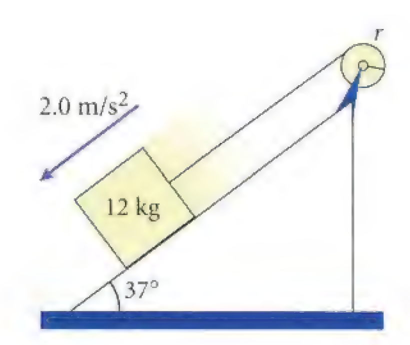
34. إذا كان العزمُ المطلوبُ لفكِّ صَمولةِ دولابِ سيّارةٍ 58 N•m، فما القوّةُ التي يجبُ تطبيقها عند طرفِ مفتاحٍ طولُه 0.35 m بزاويةِ 56° لفكِّ الصمولة؟

35. استُعملَ مفكٌّ مسامير طولُه 23.0 cm لفتحِ علبةِ دهان. إذا كان محورُ الدورانِ يبعدُ 2.00 cm عن طرفِ المفكّ وتمّ تطبيقُ قوّةٍ مقدارُها 84.3 N عند مقبضِ المفكّ فما القوة التي يطبقُها المفك على سطح العلبة؟

36. حُملت مسطرة مترية كتلتها 0.100 kg، عند إشارة 40.0 cm، بوساطة خيط مربوط بالسقف، ثم علّقت كتلة 0.700 kg شاقوليًّا عند إشارة 5.00 cm من المسطرة، كما عُلّقت كتلة ثانية في مكان ما على المسطرة بحيث بقيت المسطرة في حالة اتزان انتقالي ودوراني. إذا كانت قوة الشد في الخيط المتدلّي من السقف والذي يحمل المسطرة والكتلتين 19.6 N، احسب ما يلي:
أ. قيمة الكتلة الثانية.
ب. موقع النقطة التي يجب أن تُعلّقَ عليها الكتلة الثانية.

37. تبدأ قطعة نقود معدنية قطرها 0.0200 m بالتدحرج إلى أعلى منحدر خشن يميل بزاوية 15.0° مع الأفقي. تبدأ القطعة حركتها بسرعة زاويّة 45.0 rad/s فتتدحرج إلى أعلى المنحدر من دون انزلاق. ما أقصى ارتفاع تقطعها قطعة النقود على المنحدر قبل أن تتوقّف لحظيًّا عن التدحرج؟

38. تربط كتلة 12 kg بوساطة خيط يُمرَّر فوق بكرة نصف قطرها 10.0 cm كما في **الشكل 2-17**. يكون تعجيل الكتلة نحو أسفل المنحدر $2.0\ m/s^2$. افترض أن محور البكرة غير احتكاكي وكذلك سطح المنحدر، احسب:
أ. قوة الشد في الحبل.
ب. عزم القصور الذاتي للبكرة.
ج. السرعة الزاويّة للبكرة بعد 2.0 s من بدء حركتها من السكون.



الشكل 2-17

39. عند تطبيق قوّة لتدوير دولاب، تكون محصِّلة العزوم الناتجة عن القوّة المطبّقة وقوة الاحتكاك 36 N•m حول الدولاب. طُبّقت القوة لمدّة 6.0 s حيث ارتفعت السرعة الزاويّة للدولاب من 0 إلى 12 rad/s. بعدها رُفعت القوّة عن الدولاب فتوقّف بعد 65 s. أجب عن الأسئلة التالية:

أ. ما عزم القصور الذاتي للدولاب؟

ب. ما عزم قوّة الاحتكاك؟

ج. ما عدد الدورات التي أنجزها الدولاب خلال كامل الفترة الزمنية 71 s؟

40. يمرُّ حبل حول بكرة تدور حول محور ثابت. بسبب كتلة البكرة وقوّة الاحتكاك بين الحبل والبكرة لا تكون قوّة الشد متساوية في طرفي الحبل. إذا كانت قوّة الشدّ في أحد طرفي الخيط 120.0 N وفي طرفه الثاني 100.0 N والبكرة قرص منتظم كتلته 2.1 kg ونصف قطره 0.81 m، احسب التعجيل الزاوي للبكرة.

41. تتدحرج كرة صلدة على مستوى أفقي من دون انزلاق وبسرعة خطّيّة ثابتة. أثبت أن الطاقة الحركية الدورانيّة حول محور الكرة تساوي $\frac{2}{7}$ الطاقة الحركية الكلية.

المشاريع والتقارير

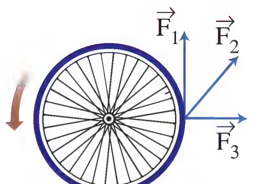
1. تخيَّلْ ميزانًا بذراعينِ مختلفَين. حيث يتمُّ اتزانُ قطعةٍ ذهبيةٍ في الكِفّةِ اليسرى للميزان بكتلةٍ 5.00 g في الكفّةِ اليمنى. إذا وضعتَ القطعةَ نفسَها في الكفّةِ اليمنى يتطلَّبُ منك الاتزانُ وضعَ كتلةٍ 15.00 g في الكفّةِ اليسرى. أيُّ الذراعينِ أطول؟ هل تحتاجُ إلى معرفةِ طولَي الذراعينِ لتحدِّدَ كتلةَ القطعة؟ اشرحْ.

2. اشرحْ بالتفصيلِ القياساتِ التي عليك القيامُ بها من أجلِ تحديدِ العزومِ الحاصلةِ أثناء قيادتِكَ دراجةً هوائية. (يجبُ أن تشتملَ خِطَطُكَ على القياساتِ التي يمكنُ القيامُ بها بوساطةِ الأجهزةِ والأدواتِ المتاحة). إذا قام زملاؤُكَ في الصفِّ بدراسةِ أنواعٍ أخرى من الدرّاجات، قارنْ أنت بين كفاءاتِ أنواعِها المختلفة.

تقويمُ الفصل 2

اختيارٌ من متعدِّد

استعمل الرسم المجاور للإجابة عن السؤالَيْن 1 و 2.



1. القوى الثلاث المؤثّرة في الدولاب لها المقدار نفسه. أي منها ينتج العزم الأكبر على الدولاب؟

أ. $\vec{F}_1$ ج. $\vec{F}_3$

ب. $\vec{F}_2$ د. القوى الثلاث تنتج العزم نفسه.

2. إذا كان مقدار كل قوّة 6.0 N، والزاوية بين $\vec{F}_1$ و $\vec{F}_2$ 60°، ونصف قطر الدولاب 1.0 m، فكم تكون محصّلة العزوم المؤثّرة في الدولاب؟

أ. −18 N•m ج. 9.0 N•m

ب. −9.0 N•m د. 18 N•m

3. إذا طُبِّقَ العزم نفسه على بكرتين لهما نصف القطر نفسه، ولم تتحرَّكا بالسرعة الزاويّة نفسها:

أ. يكون عزم القصور الذاتي لإحداهما مختلف عنه في الأخرى.

ب. يكون عزم القصور الذاتي لإحداهما مساويًا لعزم الأخرى.

ج. تكون الطاقة الحركية الدورانية لإحداهما مختلفة عما للأخرى.

د. تكون الطاقة الحركية الدورانية لإحداهما مساوية لطاقة الأخرى.

4. ما الكمية الدورانية التي تقابل الكتلة في الحركة الانتقالية؟

أ. العزم. ج. عزم القصور الذاتي.

ب. الزخم. د. الطاقة الحركية الزواية.

5. طُبِّقت قوّة مقدارها 2.0 N بشكل مماسي لقرص كتلته 5.0 kg ونصف قطره 0.1 m. ما التعجيل الزاويّ للقرص؟

أ. $80\ rad/s^2$ ج. $8\ rad/s^2$

ب. $800\ rad/s^2$ د. $0.8\ rad/s^2$

6. يقف رجل وزنه 720 N على لوح خفيف طوله 2.0 m مثبت فوق دعامتين عند طرفيه. إذا كانت المسافة بين موقع الرجل والدعامة الأولى 0.5 m، فكم تكون القوة التي تؤثر بها الدعامة الأولى في اللوح؟

أ. 540 N ج. 180 N

ب. 720 N د. 360 N

7. يتدحرج قرص كتلته 0.5 kg ونصف قطره 0.1 m على منحدر من دون انزلاق. ما الطاقة الحركية الكلية للقرص في اللحظة التي تكون فيها السرعة اللحظيّة لمركزه 1 m/s؟

أ. 0.375 J ج. 375 J

ب. 3.75 J د. 3.75×10^3 J

أسئلة ذات إجابة قصيرة

8. هل يمكن لكرتين لهما قطران مختلفان وكتلتان مختلفتان أن يكون لهما عزم القصور الذاتي نفسه؟

9. في أية حالة يكون الزخم الزاوي محفوظًا؟

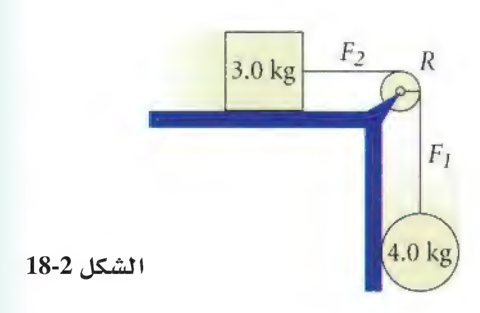
10. هل يؤدي حفظ الزخم الزاوي إلى حفظ الطاقة الحركية الدورانية؟

أسئلة ذات إجابة مطوّلة

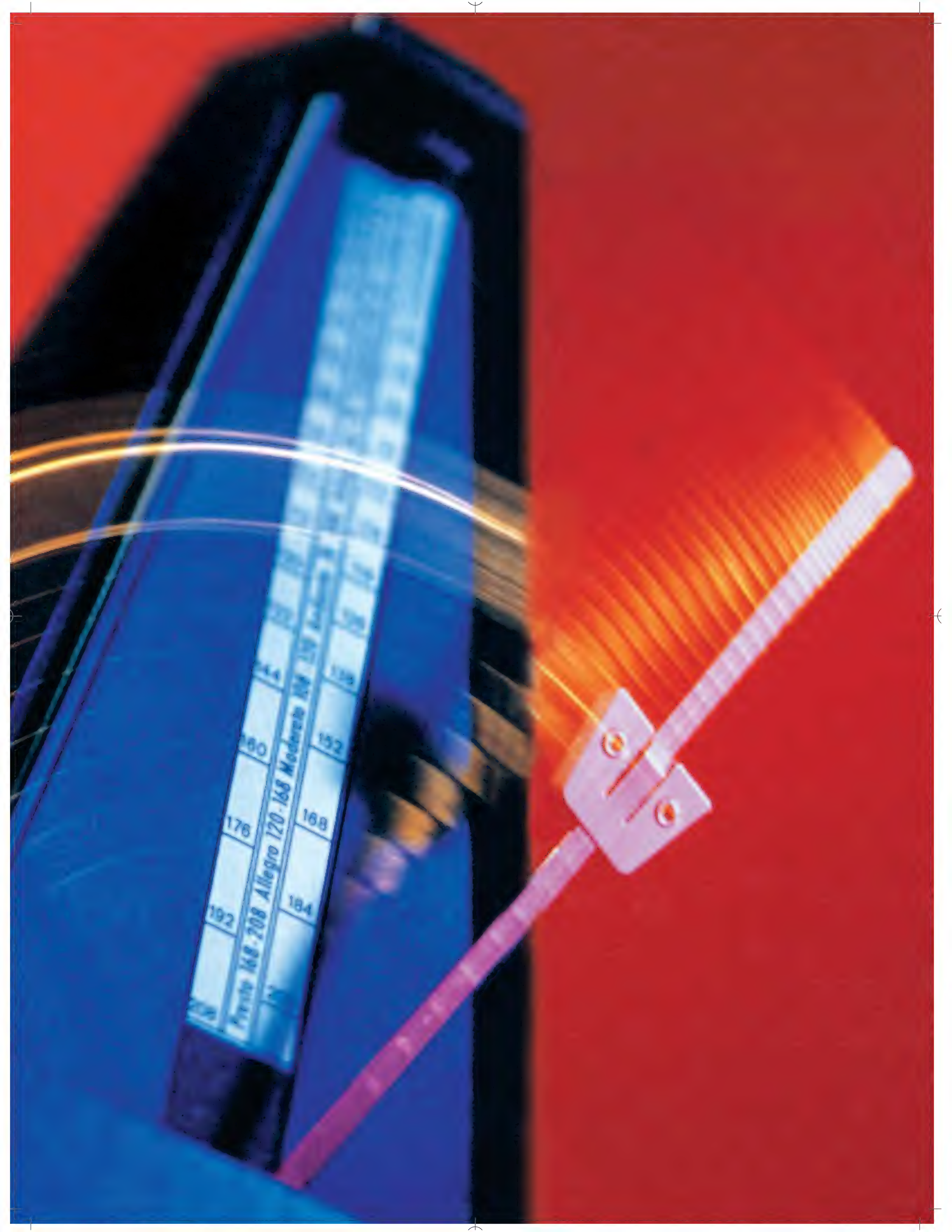
11. ربطت كتلة 4.0 kg بوساطة خيط خفيف بكتلة أخرى 3.0 kg موضوعة على سطح أفقي أملس، كما في **الشكل 18-2**. تدور البكرة حول محور أملس وعزم قصورها الذاتي $0.50\ kg•m^2$ ونصف قطرها 0.30 m. افترض أن الخيط لا ينزلق على البكرة.

أ. ما تعجيل الكتلتين؟

ب. ما قوّة الشد في طرفي الخيط F_1 و F_2؟

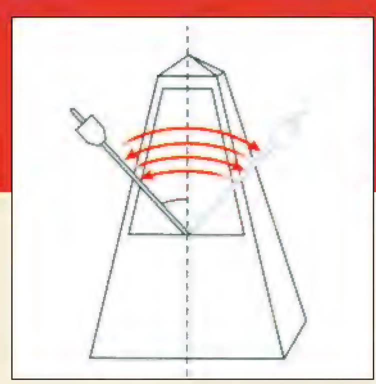


الشكل 18-2


Allegro 120-168 Moderato
176
192
168
184

الفصــــل 3

الاهتزازاتُ والموجاتُ
Vibrations and Waves



تتألَّفُ الساعة البندولية الميكانيكية من بندولٍ مقلوبٍ وثقلٍ موازنٍ على الطرفَيْن المُتقابلَيْنِ بالنسبةِ إلى محورِ الارتكاز، وثقلٍ منزلقٍ يقعُ فوقَ المحورِ يستعملُ لتغييرِ سرعةِ الاهتزاز. عندما يهتزُّ البندولُ يُصدرُ تكتكةً يستعملها الموسيقيون للحفاظِ على إيقاعٍ أو عزفٍ منتظمٍ. تُتَّخذُ اهتزازاتُ بندولِ الإيقاعِ مثالاً على *الحركةِ الدوريَّةِ*.



ما يُتوقَّعُ تحقيقُهُ

تتعرَّفُ في هذا الفصلِ نوعًا من أنواعِ الحركاتِ الدوريَّةِ يُسمَّى *الحركةَ التوافقيَّةَ البسيطةَ*. وتتعلَّمُ العلاقةَ بين الاهتزازاتِ التوافقيَّةِ البسيطةِ والموجاتِ.

ما أهميَّته

تقومُ الموجاتُ بنقلِ المعلوماتِ، على غرارِ المحادثاتِ والبثِّ التلفزيونيِّ. معظمُ ما تلتقطُه من العالَمِ الفيزيائيِّ يعتمدُ على الموجاتِ. ليسَ باستطاعتِك أن ترى أو تسمعَ، بغيابِ الموجاتِ الضوئيَّةِ والموجاتِ الصوتيَّةِ.

محتوى الفصل 3

الحركةُ التوافقيّةُ البسيطةُ

Simple Harmonic Motion

القسم 1-3

1-3 أهداف القسم

- يُحدِّدُ شروطَ الحركةِ التوافقيَّةِ البسيطةِ.
- يُفسِّرُ كيفَ تتغيَّرُ القوَّةُ والسرعةُ والتعجيلُ عندما يهتزُّ جسمٌ معيَّنٌ (نابض-كتلة، بندول) بحركةٍ توافقيَّةٍ بسيطةٍ.
- يحسبُ ثابتَ النابضِ مستعملاً قانونَ هوك.

قانونُ هوك

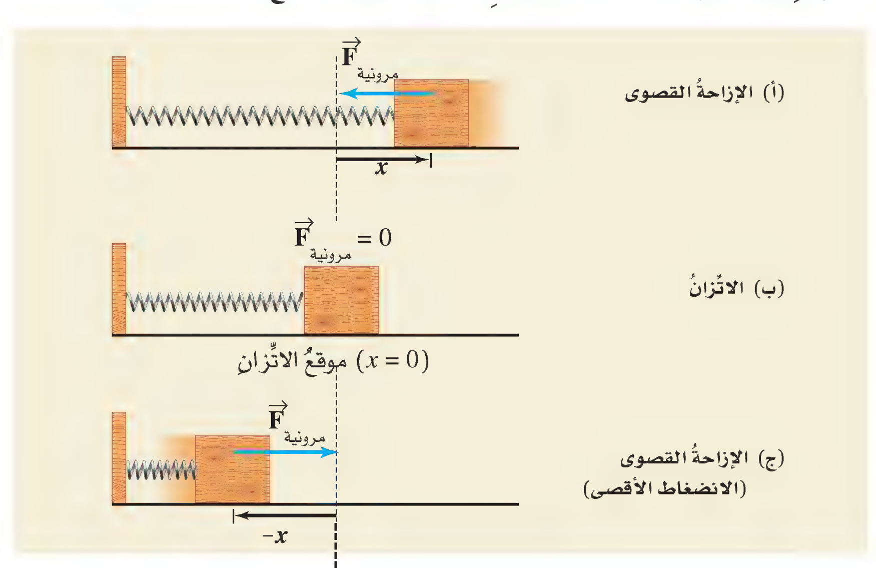
تسمَّى الحركةُ المتكرِّرةُ، كحركةِ البهلوانِ المتأرجحِ، حركةً دوريَّةً. فالولدُ على الأرجوحةِ، ورقَّاصُ الساعةِ، يشكِّلانِ أمثلةً إضافيَّةً أخرى. في كلٍّ من تلك الحالاتِ تكونُ الحركةُ الدوريَّةُ ذهابًا وإيابًا على المسارِ نفسِه.

من أبسطِ أنواعِ حركةِ الذهابِ والإيابِ الدوريَّةِ، حركةُ الكتلةِ الملتصقةِ بنابضٍ كما في **الشكل 1-3**. لنفترضْ حركةَ الكتلةِ على سطحٍ أفقيٍّ لا احتكاكيٍّ. عند استطالةِ النابضِ أو انضغاطِه، ثم إفلاتِه، تبدأُ الكتلةُ بالاهتزازِ ذهابًا وإيابًا حولَ موضعِها الأوليِّ (موقعِ الاتِّزانِ $x = 0$). سندرسُ الحركةَ بدءًا من هذا المثالِ، ثم نطبِّقُ استنتاجاتِنا على حركةِ التأرجحِ لبهلوانٍ على أرجوحتِه.

بلوغُ السرعةِ حدَّها الأقصى عندَ موقعِ الاتِّزانِ

في **الشكل 1-3** (أ) عندَ سحبِ النابضِ بقوةِ $\vec{F}$ نحوَ اليمينِ، يستطيلَ النابضُ بعيدًا عن موقعِ الاتِّزانِ بمقدارِ x. وبعدَ إفلاتِه يطبِّقُ النابضُ قوةً على الكتلةِ في اتِّجاهِ موقعِ الاتِّزانِ. تتناقصُ تلك القوةُ عندَ تحرُّكِ النابضِ في اتِّجاهِ موقعِ الاتزانِ، إلى أن تصبحَ صفرًا في موقعِ الاتِّزانِ، كما يظهرُ في **الشكل 1-3** (ب)، كذلكَ يصبحُ التعجيلُ صفرًا.

مع أن قوةَ النابضِ والتعجيلَ يتناقصان عند تحرُّكِ الكتلةِ في اتِّجاهِ موقعِ الاتِّزانِ، فإن سرعةَ الكتلةِ تزدادُ. عند موقعِ الاتِّزانِ وعندَما يصلُ التعجيلُ إلى الصفرِ، تصلُ السرعةُ إلى حدِّها الأقصى. بالرغمِ من عدمِ وجودِ قوةٍ تؤثِّرُ في الكتلةِ عندَ هذهِ النقطةِ، إلا أن لديها سرعة ابتدائية تمكّنها وفق القانون الأول لنيوتن من أن تتجاوزَ موقعَ الاتزانِ، ممّا يسبِّبُ انضغاطًا للنابضِ، كما في **الشكل 1-3** (ج).



الشكل 1-3
يكونُ اتِّجاهُ القوةِ المؤثِّرةِ في الكتلةِ $\vec{F}_{مرونية}$ معاكسًا دائمًا لاتجاهِ إزاحةِ الكتلةِ عن موقعِ الاتِّزانِ $(x = 0)$.
(أ) عندَ استطالةِ النابضِ نحوَ اليمينِ تشدُّ قوةُ النابضِ الكتلةَ نحوَ اليسارِ. (ب) عندَما لا يكونُ النابضُ في حالةِ استطالةٍ تكونُ قوةُ النابضِ صفرًا. (ج) عندَ ضغطِ النابضِ إلى اليسارِ، يكونُ اتجاهُ قوةِ النابضِ نحوَ اليمينِ.

بلوغُ قوّةِ النابضِ والتعجيل حدَّهما الأقصى عندَ الإزاحةِ القصوى

بعدَ تجاوزِ الكتلةِ موقعَ الاتّزانِ، تزدادُ قوةُ النابضِ وكذلك التعجيلُ، لكن في اتّجاهٍ معاكسٍ لاتّجاهِ حركةِ الكتلةِ، أي في اتّجاهِ موقعِ الاتّزانِ، مما يجعلُ الكتلةَ تبدأُ بالتباطؤ.

عندَما يتساوى انضغاطُ النابضِ مع الاستطالةِ الأوليَّةِ x للنابضِ عن موقعِ الاتّزانِ، كما يظهرُ في **الشكل 3-1** (ج)، تبلغُ إزاحةُ الكتلةِ أقصاها، كذلك قوةُ النابضِ وتعجيلُ الكتلةِ. عند هذه النقطةِ تصبحُ سرعةُ الكتلةِ صفرًا. قوةُ النابضِ المؤثِّرةُ في اتّجاهِ اليمينِ تسبِّبُ تغيُّرًا في اتّجاهِ حركةِ الكتلةِ، لتبدأ الكتلةُ بالتحرُّكِ إلى الوراءِ في اتّجاهِ موقعِ الاتّزانِ. بعد ذلك تتكرَّرُ العمليةُ بأكملِها وتستمرُّ الكتلةُ بالتذبذبِ ذهابًا وإيابًا على المسارِ نفسِه.

وإذا كانَ نظامُ الكتلةِ-النابضِ المثاليُّ يتذبذبُ إلى ما لا نهايةٍ، فإن الاحتكاكَ، في الواقعِ، يُبطئُ حركةَ الكتلةِ، فيجعلُ النظامَ يتوقَّفُ بعد حينٍ. يسمَّى هذا التأثيرُ *تخميدًا*. وبما أن التخميدَ يحدثُ خلالَ فترةٍ زمنيةٍ قصيرةٍ، فإن تأثيرَه ضئيلٌ جدًّا، مما يجعلُ نظامَ الكتلةِ-النابضِ المثاليَّ مثالاً فيزيائيًّا وواقعيًّا لحركةِ النظامِ.

الحركةُ التوافقيَّةُ البسيطةُ

اهتزازُ جسمٍ حولَ موقعِ اتّزانٍ تتناسبُ فيه قوّةُ الإرجاعِ طرديًّا مع الإزاحةِ من موقعِ الاتّزانِ وباتّجاهٍ معاكسٍ.

تناسُبُ قوّةِ الإرجاعِ في الحركةِ التوافقيَّةِ البسيطةِ تناسبًا طرديًّا مع الإزاحةِ

رأينا من قبل أن قوّةَ النابضِ تشدُّ الكتلةَ أو تدفعُها دائمًا، فتعيدُها رجوعًا في اتّجاهِ موقعِ الاتّزانِ الأوّلي، لذلك تسمّى أحيانًا *قوّة الإرجاع*. تشيرُ القياساتُ إلى أن قوةَ الإرجاعِ تتناسبُ طرديًّا مع إزاحةِ الكتلةِ. توصَّلَ روبرت هوك عام 1678 إلى إثباتِ أن معظمَ أنظمةِ الكتلةِ-النابضِ تعتمدُ علاقةً بسيطةً بينَ القوةِ والإزاحةِ، تعبِّرُ عنها المعادلةُ التاليةُ في حالةِ الإزاحاتِ الصغيرةِ من موقعِ الاتّزانِ:

قانونُ هوك

$$\vec{F}_{\text{مرونية}} = -k\vec{x}$$

قوةُ النابضِ = − (ثابت النابضِ × الإزاحة)

تدلُّ الإشارةُ السالبةُ في المعادلةِ السابقةِ على أن اتّجاه قوةِ النابضِ معاكسٌ دائمًا لاتّجاهِ إزاحةِ الكتلةِ من موقعِ الاتّزانِ. بمعنى آخرَ، توضحُ الإشارةُ السالبةُ ميلَ قوةِ النابضِ لتحريكِ الجسمِ رجوعًا إلى موقعِ الاتّزانِ.

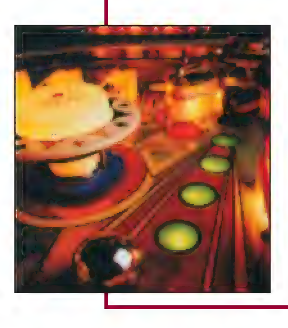
ذكرْنا في فصلِ الشغلِ والطاقةِ من كتابِ الصفِّ الحادي عشرِ، أن ثابتَ النابضِ دائمًا كمّيَّةٌ موجبةٌ تقيسُ مدى قساوةِ النابضِ، كما تمَّت الإشارةِ إلى ثابت النابضِ في فصلِ قوةِ تحمُّلِ الأجسامِ الصلبةِ في الصفِ العاشرِ. تشيرُ القيمةُ المرتفعةُ للثابتِ k إلى نابضٍ أقسى، لحاجتِه إلى قوةٍ أكبرَ لاستطالتِه أو ضغطِه. وحدةُ k في النظامِ الدولي SI هي N/m.

تُعدُّ كلُّ حركةٍ دوريَّةٍ على مسارٍ مستقيمٍ تنتجُ عن قوةٍ إرجاعٍ متناسبةٍ طرديًّا مع الإزاحةِ **حركةً توافقيَّةً بسيطةً** simple harmonic motion. وهي لذلك حركةُ ذهابٍ وإيابٍ على المسارِ نفسِه.

الفيزياءُ والحياة

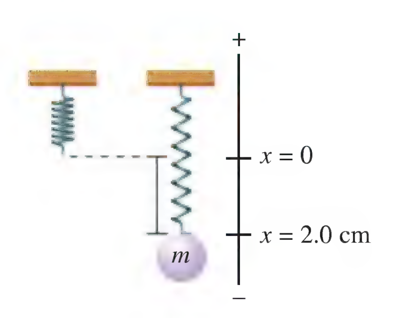
1. مدارُ الأرضِ: حركةُ الأرضِ في مدارِها حولَ الشمسِ حركةٌ دوريَّةٌ. هل هي حركةٌ توافقيَّةٌ بسيطةٌ؟ علِّلْ ذلك.

2. لعبةُ الفليبرز (الكرة والدبابيس): في هذه اللعبةِ تُستعملُ القوةُ التي يطبِّقُها نابضٌ منضغطٌ لإطلاقِ كرةٍ. كيف تتأثَّرُ قوّةُ النابضِ إذا تضاعفَتْ مسافةُ انضغاطِه؟ إذا استُبدلَ بالنابضِ نابضٌ آخرُ له نصفُ درجةِ القساوةِ، فكيف تتغيَّرُ القوةُ المؤثِّرةُ في الكرةِ؟



مثال 3 (أ)

قانونُ هوك



المسألة

عُلِّقَتْ كتلة 0.55 kg بنابض شاقولي فاستطالَ مسافة 2.0 cm من موقعِ اتّزانه الأصليّ. ما ثابتُ النابضِ؟

الحـلّ

1. أعرِّفُ

المعطى:

$m = 0.55$ kg

$x = -2.0$ cm $= -0.020$ m

$g = 9.81$ m/s^2

المجهول:

$k = ?$

الرسم:

$\vec{F}_e$

$\vec{F}_g$

2. أخطِّطُ

أختارُ معادلةً أو موقفًا: عندَ تعليقِ الكتلةِ بالنابضِ يتغيَّرُ موقعُ الاتِّزانِ. في الموقعِ الجديدِ للاتّزانِ تكونُ محصِّلةُ القوى المؤثِّرةِ في الكتلةِ صفرًا. لذلك يجبُ أن تتساوى قوةُ النابضِ (تبعًا لقانونِ هوك) مع وزنِ الكتلةِ بالمقدارِ، وتعاكسَها في الاتِّجاهِ.

$$\vec{F}_{\text{المحصلة}} = 0 = \vec{F}_e + \vec{F}_g$$

$$F_e = -kx$$

$$\vec{F}_e = -\vec{F}_g$$

$$-F_g = -kx$$

$$-mg = -kx$$

أعيدُ ترتيبَ المعادلةِ لعزلِ المجهولِ:

$$k = \frac{-mg}{-x}$$

3. أحسبُ

أعوِّضُ القيمَ في المعادلةِ وأحسبُ:

$$k = \frac{-(0.55\ \text{kg})(9.81\ \text{m/s}^2)}{-0.020\ \text{m}}$$

$$\boxed{k = 270\ \text{N/m}}$$

جوابُ الآلةِ الحاسبةِ

جوابُ الآلةِ الحاسبةِ هو $k = 269.775$.
يجبُ تقريبُهُ إلى رقمَيْنِ معنويَّيْنِ،
فيصبح $k = 270$ N/m.

4. أقيِّمُ

تشيرُ هذه القيمةُ لثابتِ النابضِ إلى أنَّ قوةً مقدارُها حوالي 270 N تلزمُ لإطالةِ النابضِ مسافةَ 1 m.

تطبيق 3 (أ)

قانونُ هوك

1. قطعةُ جلدٍ خفيفةٌ موصولةٌ برباطَيْن من مطّاطٍ. تلزمُ قوةٌ 32 N لإطالةِ الرباطَيْن مسافةَ 1.2 cm، ما ثابتُ نابضٍ مكافئٍ للرباطَيْن؟

2. ما مقدارُ القوّةِ اللازمةِ لشدِّ قطعةِ الجلدِ في السؤالِ 1 مسافةَ 3.0 cm من موقعِ اتّزانِها؟

الطاقةُ الكامنةُ المرونيةُ للنابضِ في حالتَي الاستطالةِ والانضغاطِ

درسْنا في فصلِ «الشغلُ والطاقةُ» من كتابِ الصفِّ الحادي عشر كيف يخزِّنُ نابضٌ انضغطَ أو استطالَ كمّيَّةً من الطاقةِ الكامنةِ المرونيَّةِ. للتحقُّقِ من ذلك ندرسُ مثالَ القوسِ والسهمِ الظاهرَ في **الشكل 3-2**. عند شدِّ خيطِ القوسِ إلى الوراءِ ينحني القوسُ ليصبحَ الوضعُ شبيهًا بإطالةِ نابضٍ. ولتبسيطِ الحالةِ يُفترضُ غيابُ الاحتكاكِ والطاقةِ الداخليَّةِ.

يختزنُ القوسُ طاقة كامنة مرونيَّة كلَّما شُدَّ فيه خيطُ القوسِ إلى الوراءِ. وبما أن نظامَ القوسِ والسهمِ وخيطِ القوسِ هو حاليًّا في حالةِ سكونٍ، فإن الطاقةَ الحركيةَ للنظامِ صفرٌ وطاقتَهُ الميكانيكيَّةَ طاقة كامنة مرونيَّة فقطْ.

عندَ إفلاتِ الخيطِ تتحوَّلُ الطاقةُ الكامنةُ المرونيَّةُ للقوسِ إلى طاقةٍ حركيةٍ للسهمِ. لحظةَ انطلاقِ السهمِ من الخيطِ يكتسبُ السهمُ معظمَ الطاقةِ الكامنةِ المرونيَّةِ المختزَنةِ أصلاً في القوسِ. (يتحوَّلُ الباقي إلى طاقةٍ حركيةٍ في القوسِ والخيطِ.) إذًا في كلِّ مرَّةٍ يُطلقُ فيها السهمُ تكونُ الطاقةُ الميكانيكيَّةُ للنظامِ طاقةً حركيَّةً فقط. ووفقًا لمبدأ حفظِ الطاقةِ الميكانيكيَّةِ تكونُ الطاقةُ الحركيَّةُ للنظامِ (القوسِ والسهمِ والخيطِ) مساويةً للطاقةِ الكامنةِ المرونيَّةِ المختزَنةِ أصلاً في القوسِ.



الشكل 3-2
الطاقةُ الكامنةُ المرونيَّةُ المختزنةُ في القوسِ الذي استطالَ تحوَّلَتْ إلى طاقةٍ حركيةٍ للسهمِ.

نافذةٌ على الموضوع
مخمِّداتُ الصدماتِ

مما لاشكَّ فيه أن المطبَّاتِ على الطرقِ تشكِّلُ إزعاجًا للسائقِ. لكن إذا لم تتوفَّرْ أجهزةُ التخميدِ العمليَّةُ المناسبةُ فالمطبَّاتُ قد تكونُ مميتةً. يحتاجُ السائقُ للسيطرةِ على حافلةٍ تسيرُ بسرعةِ 110 km/h أن يُبقيَ عجلاتِها الأربعَ على الأرضِ. المطبَّاتُ بدورِها ترفعُ العجلاتِ عن الطريقِ فتنزعُ من السائقِ السيطرةَ على القيادةِ. يكمنُ الحلُّ الأنسبُ في رفعِ السيارةِ بوساطةِ نابضٍ على كلِّ عجلةٍ. تمتصُّ تلك النوابضُ الطاقةَ عند ارتفاعِ العجلاتِ فوقَ المطبَّاتِ، وتدفعُ العجلاتِ ثانيةً فتبقيها على الطريقِ. لكن عند تحرُّكِها تميلُ النوابضُ لمواصلةِ الحركةِ صعودًا ونزولاً بحركةٍ توافقيَّةٍ بسيطةٍ تؤثِّرُ في سيطرةِ السائقِ على السيارةِ، وتسبِّبُ له إزعاجًا.

إحدى طرائقِ كبحِ الاهتزازاتِ غيرِ المرغوبِ فيها هي استعمالُ نوابضَ صلبةٍ يمكنُ ضغطُها لبضعةِ سنتيمتراتٍ فقط، بوساطةِ قوى مقدارُها آلافُ النيوتناتِ (N). لتلكَ النوابضِ ثابتٌ عالٍ جدًّا، فهي من ثمَّ لا تهتزُّ بالنعومةِ والسهولةِ نفسِها التي تهتزُّ بها نوابضُ ذاتُ ثوابتَ منخفضةٍ. لكنَّ هذا الحلَّ يضعفُ قدرةَ السائقِ على إبقاءِ العجلاتِ على الأرضِ.

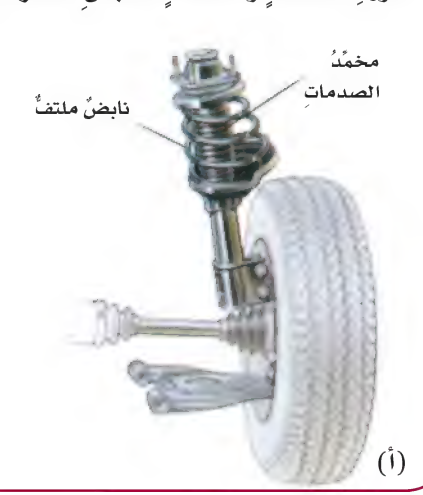
لحلِّ تلك المشكلةِ نهائيًّا تثبَّتُ في بعضِ الحافلاتِ أجهزةُ امتصاصِ طاقةٍ، تسمَّى *مخمِّداتِ الصدماتِ*، بوضعٍ موازٍ للنابضِ، كما يظهرُ في **الشكل** (أ) من الرسمِ التالي. مخمِّداتُ الصدماتِ أنابيبُ مملوءةٌ بمائعٍ يحوِّلُ الحركةَ التوافقيَّةَ البسيطةَ للنابضِ إلى حركةٍ توافقيَّةٍ مخمَّدةٍ، حيث تكونُ كلُّ دورةِ استطالةٍ وانضغاطٍ للنابضِ أصغرَ من الدورةِ السابقةِ.

وقد أُعدَّتْ أجهزةُ تعليقِ السياراتِ الحديثةِ بشكلٍ يسمحُ لمخمِّداتِ الصدماتِ بامتصاصِ طاقةِ النابضِ بكاملِها، وذلك بالتخلُّصِ من الاهتزازاتِ خلالَ دورةٍ واحدةٍ إلى أعلى وأسفل. يصونُ ذلك الجهازُ السيارةَ من التوثُّباتِ والارتداداتِ المستمرَّةِ دون أن يخسرَ النابضُ قدرتَه على إبقاءِ العجلاتِ على الطريقِ.

يتمُّ مزجُ ثوابتِ نوابضَ مع درجاتِ تخميدٍ لمخمِّداتِ صدماتٍ مختلفةٍ، لتغطيةِ تعدُّديَّةٍ واسعةٍ لاستجاباتِ الطرقِ. فمثلاً، تُزوَّدُ الحافلاتُ الضخمةُ بنوابضَ صفائحيَّةٍ قويَّةِ الاحتمالِ مصنوعةٍ من صفائحَ فولاذيَّةٍ مكبوسةٍ، لها ثابتُ نابضٍ يفوقُ ثابتَ النابضِ الملتفِّ (اللولبي).

في هذا النوعِ من أجهزةِ التعليقِ يثبَّتُ مخمِّدُ الصدماتِ بشكلٍ عموديٍّ مع النابضِ، كما يظهرُ في **الشكل** (ب) من الرسمِ. عندَ القيادةِ قد تؤثِّرُ صلابةُ النابضِ في زمنِ الاستجابةِ والشعورِ العامِّ الذي يرافقُ انطلاقَ السيارةِ وسيرَها.

نتيجةً لتعدُّدِ المجموعاتِ المحتملةِ قد يراوحُ شعورُك في القيادةِ بين رفاهيَّةِ السيارةِ المترفةِ وارتجاجاتِ سيارةِ السباقِ المزعجةِ.

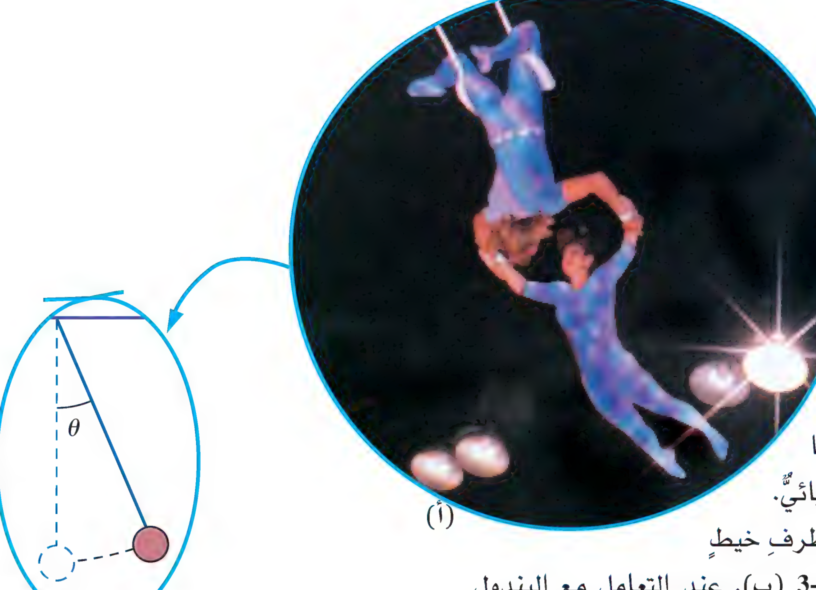


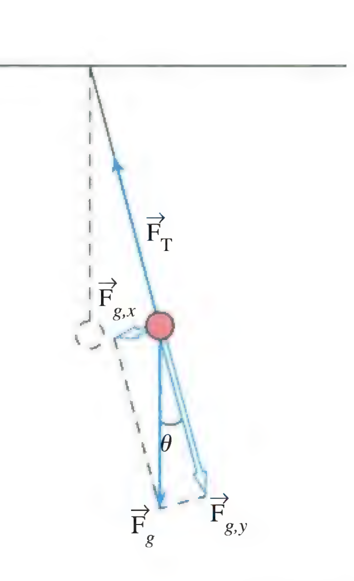


البندولُ البسيطُ

رأينا من قبلُ أن الحركةَ الدوريَّةَ لنظامِ الكتلة-النابض، تُعدُّ مثالاً على الحركةِ التوافقيَّةِ البسيطةِ. لنتفحَّصِ الحركاتِ البهلوانيَّةَ الظاهرةَ في **الشكل 3-3** (أ). تُعدُّ حركةُ تأرجحِ البهلوانِ الشبيهةُ باهتزازاتِ نظامِ الكتلة-النابض، اهتزازةً دوريَّةً. هل تُعدُّ حركةُ البهلوانِ على الأرجوحةِ مثالاً على الحركةِ التوافقيَّةِ البسيطةِ؟

للإجابةِ عن هذا السؤالِ نستعملُ بندولاً بسيطًا كنموذجٍ عن حركةِ البهلوانِ التي هي بندولٌ فيزيائيٌّ.





(أ) (ب)

الشكل 3-3

(أ) حركةُ بهلوانِ الأرجوحةِ وضعت في النموذجِ (ب) كبندولٍ بسيطٍ.

يتألفُ البندولُ البسيطُ من *كتلةٍ* أو كرةٍ موصولةٍ بطرفِ خيطٍ متأرجحٍ حولَ محورٍ ثابت كما يظهر في **الشكل 3-3** (ب). عند التعامل مع البندولِ البسيطِ نهملُ كتلةَ الخيطِ ونفترضُ أن كتلةَ البندولِ مركَّزةٌ في نقطةٍ. بالإضافةِ إلى ذلك، نفترضُ عدمَ تأثيرِ الاحتكاكِ ومقاومةِ الهواءِ في حركةِ البندولِ. بالمقابلِ فإننا في البندولِ الفيزيائيِّ نراعي توزيعَ الكتلةِ والاحتكاكَ ومقاومةَ الهواءِ. ورغبةً منا في تبسيطِ التحليلِ ومنعًا للتعقيدِ سوف نعُدُّ البندولَ البسيطَ النموذجَ التقريبيَّ المقبولَ لبندولٍ فيزيائيٍّ في جميعِ الأمثلةِ التي سترِدُ.

قوةُ الإرجاعِ في البندولِ إحدى مركَّبتَي وزنِ كُرتِه

للتحقُّقِ من أن حركةَ البندولِ توافقيَّةٌ بسيطةٌ أم لا، يجبُ أولاً تفحُّصُ القوى المؤثِّرةِ في الكرةِ لتحديدِ قوةِ الإرجاعِ. إذا تبيَّنَ أن قوةَ الإرجاعِ متناسبةٌ طرديًّا مع الإزاحةِ، تكونُ حركةُ البندولِ توافقيَّةً بسيطةً. لنخترْ نظامَ إحداثيّاتٍ يكونُ فيه محورُ x مماسًّا لاتجاهِ الحركةِ، ومحورُ y عموديًّا على اتِّجاهِ الحركةِ. بما أن الكرةَ تغيِّرُ موقعَها دائمًا، فإن موقعَ هذا النظامِ يتغيَّرُ معها على كلِّ نقطةٍ من حركتِها.

القوَّتانِ المؤثِّرتانِ في الكرةِ عند كلِّ نقطةٍ من مسارِها هما قوةُ شدِّ الخيطِ $\vec{F}_T$ ووزنُ الكرةِ $\vec{F}_g$. القوةُ في الخيطِ تشدُّ دائمًا في اتِّجاهِ محورِ y، أي على طولِ الخيطِ. يمكنُ تحليلُ وزنِ الكرةِ على أي موقعٍ، عدا موقعَ الاتِّزانِ، إلى مركَّبتَيْنِ على المحورَيْنِ x و y، كما يظهرُ في **الشكل 3-4**. وبما أن كلتا القوتَيْنِ، قوةِ شدِّ الخيطِ والمركَّبةِ y لوزنِ الكرةِ، متعامدتانِ مع اتِّجاهِ حركةِ الكرةِ، فإن المركَّبةَ x لوزنِ الكرةِ تصبحُ القوةَ المحصِّلةَ والمؤثِّرةَ في الكرةِ في اتجاهِ حركتِها. في هذه الحالةِ، تحاولُ المركَّبةُ x لوزنِ الكرةِ سحبَ الكرةِ أو شدَّها دائمًا في اتِّجاهِ موقعِ الاتِّزانِ، وهي بذلك قوةُ إرجاعٍ. لاحظْ أن قوةَ الإرجاعِ ($F_{g,x} = F_g \sin\theta$) تساوي صفرًا عند موقعِ الاتِّزانِ، لأن الزاويةَ θ تساوي صفرًا عندَ تلك النقطةِ.

الشكل 3-4

عند كلِّ إزاحةٍ من موقعِ الاتزانِ، يمكنُ تحليلُ وزنِ الكرةِ ($\vec{F}_g$) إلى مركَّبتَيْنِ. المركَّبةُ x ($\vec{F}_{g,x}$) عموديَّةٌ على الخيطِ، وهي القوةُ الوحيدةُ المؤثِّرةُ في الكرةِ في اتِّجاهِ الحركةِ.

حركةُ البندولِ توافقيَّةٌ بسيطةٌ في حالةِ زاويةِ تأرجحٍ صغيرةٍ

كما هي الحالُ في نظامِ الكتلة-النابض فإن قوةَ الإرجاعِ للبندولِ البسيطِ ليسَت ثابتةً. بالمقابلِ يتغيَّرُ مقدارُ قوةِ الإرجاعِ بتغيُّرِ مسافةِ الكرةِ من موقعِ الاتِّزانِ. إذ يتناقصُ مقدارُ قوةِ الإرجاعِ كلَّما اقتربَتِ الكرةُ من موقعِ الاتزانِ، إلى أن تصبحَ صفرًا عندَ

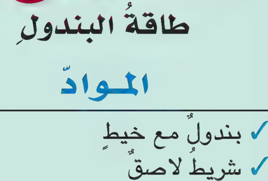
الموقع. لكن ومع زاويةِ تأرجحٍ صغيرةٍ نسبيًّا (أقل من $15°$) تتناسبُ قوةُ الإرجاعِ طرديًّا مع الإزاحةِ من موقعِ الاتزانِ. فإذا كانتِ الزوايا الإزاحيَّةُ صغيرةً تكونُ حركةُ البندولِ توافقيَّةً بسيطةً. نفترضُ حالةَ الزوايا الإزاحيةِ الصغيرةِ ما لم يُذكَرِ العكس.

بما أن الحركةَ الاهتزازيَّةَ للبندولِ البسيطِ توافقيَّةٌ بسيطة فتصحُّ هنا معظمُ استنتاجاتِنا المتعلِّقةِ بنظامِ الكتلة–النابض. عندَ الإزاحةِ القصوى تصلُ قوةُ الإرجاعِ والتعجيلُ إلى حدِّهما الأقصى بينما تصبحُ السرعةُ صفرًا. بالمقابلِ تكونُ قوةُ الإرجاعِ والتعجيلُ صفرًا عندَ موقعِ الاتزانِ، بينما تصلُ السرعةُ إلى قيمتِها القصوى. يُظهرُ **الجدولُ 1-3** مقارنةً بين البندولِ البسيطِ ونظامِ الكتلة–النابض.

الجدول 1-3 **الحركةُ التوافقيَّةُ البسيطةُ**

الموقع	الكميات
الإزاحةُ القصوى	$\vec{F}_x=\vec{F}_{\text{قصوى}}$ ، $\vec{a}=\vec{a}_{\text{قصوى}}$ ، $\vec{v}=0$
الاتّزان	$\vec{F}_x=0$ ، $\vec{a}=0$ ، $\vec{v}=\vec{v}_{\text{قصوى}}$
الإزاحةُ القصوى (الانضغاط الأقصى)	$\vec{F}_x=\vec{F}_{\text{قصوى}}$ ، $\vec{a}=\vec{a}_{\text{قصوى}}$ ، $\vec{v}=0$
الاتزان	$\vec{F}_x=0$ ، $\vec{a}=0$ ، $\vec{v}=\vec{v}_{\text{قصوى}}$
الإزاحةُ القصوى	$\vec{F}_x=\vec{F}_{\text{قصوى}}$ ، $\vec{a}=\vec{a}_{\text{قصوى}}$ ، $\vec{v}=0$

$-x$ 0 $+x$

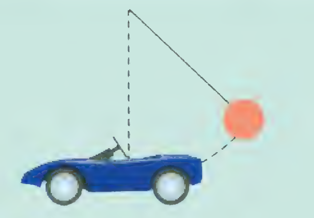


نشاط عملي سريع

طاقةُ البندولِ

المـوادّ

- ✓ بندولٌ مع خيط
- ✓ شريطٌ لاصقٌ
- ✓ سيّارةٌ–لعبةٌ
- ✓ منقلة
- ✓ مسطرةٌ متريَّةٌ أو شريطٌ متري



ثبِّتْ كرةَ البندولِ بأحدِ طرفيِ الخيطِ مستعملاً شريطًا لاصقًا. ضعِ السيارةَ–اللعبةَ على سطحٍ أملسَ وأمسكْ بالخيطِ مباشرةً فوقَ السيارةِ، بحيثُ تستقرُّ الكرةُ على السيارةِ. ارفعِ الكرةَ باليدِ الأخرى إلى موقعٍ يسمحُ لزميلِكَ بقياسِ زاويةِ البندولِ مستعملاً المنقلةَ.

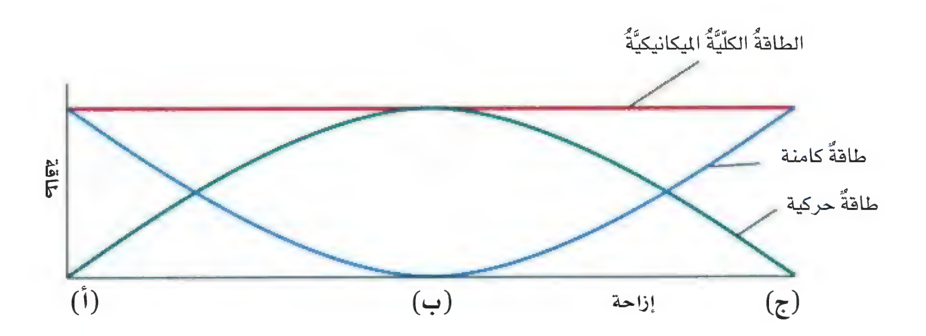
أفلتِ الكرةَ لتتأرجحَ وتصطدمَ بالسيارةِ. قِسْ إزاحةَ السيارةِ. ماذا حصلَ لطاقةِ البندولِ الكامنةِ بعد إفلاتِ الكرةِ؟ أعدِ العمليةَ مستعملاً زوايا مختلفةً. كيف تعلِّلُ نتائجَك؟

ازديادُ الطاقةِ الكامنةِ الجذبيَّةِ مع ازديادِ إزاحةِ البندولِ

كما في نظامِ الكتلة-النابض، فإن الطاقةَ الميكانيكيَّةَ لبندولٍ بسيط محفوظةٌ لنظامٍ مثاليٍّ (لا احتكاكيٍّ). لكنَّ الطاقةَ الكامنةَ للنابضِ مرونيَّةٌ والطاقةَ الكامنةَ للبندولِ جذبيَّةٌ. نعرّفُ القيمةَ الصفريَّةَ للطاقةِ الكامنةِ الجذبيَّةِ للبندول عندَ المستوى الأسفلِ للتأرجح.

يظهرُ في **الشكل 3-5** كيف تتغيَّرُ الطاقةُ الكامنةُ الجذبيَّةُ للبندولِ حين يتأرجحُ. عند أقصى إزاحةٍ من موقعِ الاتزانِ تكونُ طاقةُ البندولِ بأكملِها طاقةً كامنةً جذبيَّةً، وعند تأرجحِهِ نزولاً في اتجاهِ موقعِ الاتزانِ، يكتسبُ البندولُ طاقةً حركيةً ويفقدُ من طاقتِه الكامنةِ، إلى أن تتحوَّلَ الطاقةُ كليًّا إلى طاقةٍ حركيةٍ عندَ موقعِ الاتزانِ.

بُعَيدَ تجاوزِ الكرةِ موقعَ الاتزانِ، تبدأُ الطاقةُ الحركيةِ بالتناقصِ بينما تبدأُ الطاقةُ الكامنةِ الجذبيَّةِ بالازديادِ، وعندَ أقصى ارتفاعٍ للكرةِ، تتحوَّلُ طاقةُ البندولِ كليًّا إلى طاقةٍ كامنةٍ جذبيَّةٍ.



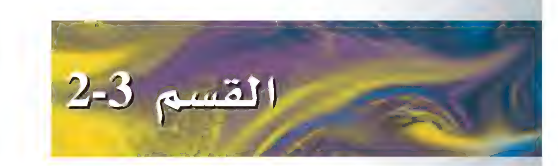
الشكل 3-5
سواءٌ كانَتِ الإزاحةُ القصوى (أ)، الاتِّزانُ (ب) أو الإزاحةُ القصوى في الاتجاهِ الآخرِ (ج) تبقى الطاقةُ الميكانيكيَّةُ نفسَها. لكن، وكما يُظهرُ الرسمُ البيانيّ، تكونُ الطاقتان الحركيةِ والكامنةِ في حالةِ تغيُّرٍ دائم.

مراجعةُ القسم 3-1

1. أيٌّ من الحركاتِ الدوريَّةِ التاليةِ حركةٌ توافقيَّةٌ بسيطةٌ؟
- **أ.** طفلٌ يتأرجحُ على أرجوحةٍ ($\theta = 45°$).
- **ب.** أسطوانةٌ تدورُ حولَ محورٍ شاقوليٍّ في مركزِها.
- **ج.** بندولُ ساعةِ حائطٍ يتأرجحُ ($\theta = 10°$).

2. كيف تتغيَّرُ قوةُ الإرجاعِ المؤثِّرةُ في كرةِ بندولٍ خلالَ تأرجحِ الكرةِ في اتِّجاهِ موقعِ الاتِّزانِ؟ كيف يتغيَّرُ تعجيلُ الكرةِ وسرعتُها (في اتِّجاهِ الحركةِ)؟

3. **تفكيرٌ ناقد:** عندما يصلُ البهلوانُ إلى موقعِ الاتِّزانِ تكونُ القوةُ المحصِّلةُ المؤثِّرةُ في اتِّجاهِ الحركةِ صفرًا. ما السببُ الذي يجعلُ البهلوانَ يستمرُّ في التأرجحِ مرورًا بموقعِ الاتِّزانِ؟



قياسُ الحركةِ التوافقيَّةِ البسيطةِ
Measuring Simple Harmonic Motion

2-3 أهداف القسم

- يحدِّدُ سعةَ الاهتزازة.
- يتعرَّفُ علاقةَ الزمنِ الدوريِّ بالتردُّد.
- يحسبُ الزمنَ الدوريَّ والتردُّدَ لجسمٍ يهتزُّ بحركةٍ توافقيَّةٍ بسيطةٍ.

السعة

الإزاحةُ القصوى من موقعِ الاتِّزانِ.

الزمنُ الدوريُّ

الزمنُ المستغرَقُ لتنفيذِ دورةٍ حركيَّةٍ كاملةٍ.

التردُّد

عددُ الدوراتِ أو الاهتزازاتِ في وحدةِ الزمن.

السعةُ والزمنُ الدوريُّ والتردُّدُ

في غيابِ الاحتكاكِ، يعودُ البهلوانُ دائمًا إلى الإزاحةِ القصوى بعدَ كلِّ تأرجحٍ. تُسمّى تلك الإزاحةُ القصوى من موقعِ الاتِّزانِ **السعةَ** amplitude. يتمُّ قياسُ سعةِ اهتزازةِ البندولِ بالزاويةِ بينَ موقعِ الاتِّزانِ للبندولِ وإزاحتِه القصوى. أما نظامُ الكتلةِ–النابض فسعتُه تكونُ القيمةَ القصوى للاستطالةِ أو الانضغاطِ من موقعِ الاتِّزانِ.

قياسُ الزمنِ من خلالِ الزمنِ الدوريِّ والتردُّدِ

تخيَّلْ نفسَك جالسًا في اللعبةِ الظاهرةِ في **الشكل 6-3** تتأرجحُ من إزاحةٍ قصوى في أحدِ جانبي الاتِّزانِ إلى إزاحةٍ قصوى في الجانبِ الآخرِ، ثم تعودُ ثانيةً إلى نقطةِ البدايةِ. تُسمّى هذه الرحلةُ دورةً كاملةً للحركةِ. أما **الزمنُ الدوريُّ**، T، period فهو الفترةُ الزمنيَّةُ التي استغرقَتْها الدورةُ الكاملةُ.

إذا استغرقَتْ، مثلاً، دورةٌ كاملةٌ 20 s يكونُ الزمنُ الدوريُّ 20 s. لاحظْ أن الجسمَ، بعدَ زمنٍ دوريٍّ T، يعودُ إلى الموقعِ الذي انطلقَ منه. يُسمّى عددُ الدوراتِ التي تتأرجحُ بها اللعبةُ خلالَ وحدةٍ من الزمنِ **تردُّدَ** اللعبةِ، f، frequency. إذا استغرقَتْ دورةٌ كاملةٌ 20 s يكونُ تردُّدُ اللعبةِ $\frac{1}{20}$ دورةً في الثانيةِ أو 0.05 Hz. وحدةُ التردُّدِ في نظامِ SI هي s^{-1} أو هيرتز (Hz).

قد تخلطُ بينَ مفهومَي الزمنِ الدوريِّ والتردُّدِ. فكلاهما يتعلَّقُ بالحركةِ التوافقيَّةِ البسيطةِ. تذكَّرْ أن الزمنَ الدوريَّ هو زمنُ دورةٍ واحدةٍ. أما التردُّدُ فهو عددُ الدوراتِ في وحدةِ الزمنِ، وبالتالي فإن العلاقةَ بينَهما علاقةٌ عكسيَّةٌ.

$$T = \frac{1}{f} \text{ أو } f = \frac{1}{T}$$

لقد استُعملَتْ هذه العلاقةُ لحسابِ تردُّدِ اللعبةِ.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{20\ s} = 0.05\ Hz$$

يتضمَّنُ **الجدول 2-3** تعريفًا لكلٍّ من السَّعةِ والزمنِ الدوريِّ والتردُّدِ بالإضافةِ إلى مثالٍ على كلٍّ منها، وإلى وحداتِها في النظامِ SI.



الشكل 6-3

في كلِّ حركةٍ دوريَّةٍ يكونُ الزمنُ الدوريُّ والتردُّدُ مترابطين عكسيًّا.

الجدول 2-3 **قياساتُ الحركةِ التوافقيَّةِ البسيطةِ**

المصطلح	المثال	التعريف	الوحدة SI
السعة		الإزاحةُ القصوى من موقعِ الاتِّزان	راديَن rad متر m
الزمنُ الدوريُّ T		الزمنُ المُستغرَقُ لتنفيذِ دورةٍ كاملةٍ من الحركةِ	ثانية s
التردُّد f		عددُ الدوراتِ أو الاهتزازاتِ في وحدةِ الزمنِ	هيرتز Hz $(Hz = s^{-1})$

علاقةُ الزمنِ الدوريِّ للبندولِ بطولِ البندولِ وتعجيلِ السقوطِ الحرِّ

بالرغمِ من أن البندولَ البسيطَ ونظامَ الكتلة–النابض يهتزَّان بحركةٍ توافقيَّةٍ بسيطةٍ، فإن حسابَ الزمنِ الدوريِّ والتردُّدِ لكلٍّ منهما يتطلَّبُ معادلةً منفصلة. سببُ ذلك أن الزمنَ الدوريَّ والتردُّدَ في كلٍّ منهما يعتمدان على عواملَ فيزيائيَّةٍ مختلفةٍ.

لنأخذْ بندولَيْن مختبريَّيْن طولُ كلٍّ منهما L، لكن كتلتَيْ كرتَيْهما مختلفتان. يقاسُ طولُ البندولِ من نقطةِ محورِ التأرجحِ إلى مركزِ كتلةِ الكرة. إذا سحبْتَ كرتَي البندولَيْن المسافةَ الصغيرةَ نفسَها ثم أفلتَّهما، تجدُ أنهما تكملانِ اهتزازةً واحدةً خلال الفترةِ الزمنيَّةِ نفسِها. إذا غيَّرتَ في محاولةٍ ثانيةٍ المسافةَ الصغيرةَ لأحدِ البندولَيْن تجدُ أن الزمنَ الدوريَّ للبندولَيْن لا يزالُ نفسَه. إذن، في حالةِ السعةِ الصغيرةِ، لا يعتمدُ الزمنُ الدوريُّ للبندولِ على سعتِه أو كتلته.

لكن عندَ تغييرِ طولِ البندولِ يتغيَّرُ زمنُه الدوريُّ. كما أن كلَّ تغيُّرٍ في تعجيلِ السقوطِ الحرِّ يؤثِّرُ في الزمنِ الدوريِّ للبندول. الاشتقاقُ الصحيحُ للعلاقةِ بينَ هذه المتغيِّراتِ يمكنُ التوصُّلُ إليه رياضيًّا أو مختبريًّا.

الزمنُ الدوريُّ لبندولٍ في حركةٍ توافقيَّةٍ بسيطةٍ

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{a_g}}$$

الزمنُ الدوري = 2π × الجذر التربيعي لـ(الطول مقسومًا على تعجيلِ السقوطِ الحرِّ)

لماذا يعتمدُ الزمنُ الدوريُّ للبندولِ على طولِ البندولِ وتعجيلِ السقوطِ الحرِّ؟ إذا كانَ لبندولَيْن السعةُ نفسُها وطولٌ مختلفٌ، يتحرَّكُ البندولُ الأقصرُ على قوسٍ أقصرَ،

هل تعلم؟

يعودُ الفضلُ إلى غاليليو لأنَه كانَ أوَّلَ مَن لاحظَ أن حركةَ البندولِ تعتمدُ على طولِه ولا تعتمدُ على سعتِه (في حالةِ الزوايا الصغيرة). فقد كانَ بندولُه ثُريًّا تحملُ شمعًا، وتتأرجحُ من سقفِ مبنًى عالٍ بعد أن دُفعَتْ خطأً أثناءَ إضاءةِ شموعِها. يُعتقدُ أن غاليليو قد قاسَ تردُّدَها ثمَّ الزمنَ الدوريَّ، مستعملاً نبضاتِه في توقيتِ التأرجحِ.

كما يظهرُ في **الشكل 3-7**. بما أن تعجيلَ السقوطِ الحرِّ هو نفسُه للبندولَيْن، يكونُ للبندولِ الأقصرِ زمنٌ دوريٌّ أقلُّ.

لمَ لا تؤثِّرُ الكتلةُ والسعةُ في الزمنِ الدوريِّ للبندول؟ عندَما تختلفُ كتلةُ الكرةِ في بندولَيْن لهما طولُ الخيطِ نفسُه تُحدثُ الكتلةُ الكبرى قوةَ إرجاعٍ أكبرَ، لكنَّها تحتاجُ أيضًا إلى قوةٍ أكبرَ لتحقيقِ التعجيلِ نفسِه. هذا الوضعُ شبيهٌ بالأجسامِ التي تسقطُ سقوطًا حرًّا بالتعجيلِ نفسِه، على الرغمِ من اختلافِ كتلِها.

في حالاتِ الزوايا الصغيرةِ (الأقلِّ من 15^{o})، إذا ازدادَتْ سعةُ البندولِ تزدادُ قوةُ الإرجاعِ بتناسبٍ طرديٍّ. وبما أن القوةَ تتناسبُ طرديًّا مع التعجيلِ فإن التعجيلَ الابتدائيَّ يكونُ أكبرَ. لكنَّ المسافةَ التي يجبُ أن يقطعَها البندولُ تكونُ أكبرَ أيضًا. في حالاتِ الزوايا الصغيرةِ يُلغي تأثيرا هاتَيْن الكمِّيتَيْن أحدُهما الآخرَ. وبالتالي يبقى الزمنُ الدوريُّ للبندولِ نفسَه.

الشكل 3-7
عندَما يتناقصُ طولُ أحدِ البندولَيْن، تنقصُ أيضًا المسافةُ التي يقطعُها البندولُ من موقعِ الاتِّزان. بما أن تعجيلَي البندولَيْن متساويان، يكونُ للبندولِ الأقصرِ زمنٌ دوريٌّ أقلُّ.

مثال 3 (ب)

الحركةُ التوافقيَّةُ البسيطةُ لبندولٍ بسيطٍ

المسألة

لعلَّك ترغبُ في معرفةِ ارتفاعِ برجٍ عالٍ، لكنَّ الظلامَ يحجبُ عنكَ السقفَ. تلاحظُ بندولاً مُتدلِّيًا من السقفِ يكادُ يلامسُ الأرضَ. ما ارتفاعُ البرجِ إذا كانَ الزمنُ الدوريُّ للبندولِ 12 s؟

الحــلّ

المعطى: $T = 12\ s$ $\qquad a_g = g = 9.81\ m/s^2$

المجهول: $L = ?$

أستعملُ معادلةَ الزمنِ الدوريِّ لبندولٍ بسيطٍ وأحسب L:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{a_g}}$$

$$T^2 = 4\pi^2\frac{L}{a_g}$$

$$L = \frac{T^2 a_g}{4\pi^2} = \frac{(12\ s)^2(9.81\ m/s^2)}{4\pi^2}$$

$$\boxed{L = 36\ m}$$

ملاحظة
تذكَّرْ أن a_g على سطحِ الأرضِ تساوي $g = 9.81\ m/s^2$. استعملْ هذه القيمةَ لـ a_g في معادلةِ الزمنِ الدوريِّ للبندولِ، ما لم يُذكرْ غيرُ ذلك. أما الارتفاعاتُ العاليةُ أو سطوحُ الكواكبِ المختلفة، فتُستعملُ لأجلها بدلاً من ذلك القيمةُ المعطاةُ لـ a_g.

تطبيق 3 (ب)

الحركةُ التوافقيَّةُ البسيطةُ لبندولٍ بسيطٍ

1. يتأرجحُ بهلوانٌ بحركةٍ توافقيَّةٍ بسيطةٍ وزمنٍ دوريٍّ 3.8 s. احسبْ طولَ حبلِ الأرجوحةِ.

2. احسبِ الزمنَ الدوريَّ والتردُّدَ لبندولٍ طولُه 3.500 m في المواقعِ التاليةِ:

أ. القطبِ الشماليِّ للكرةِ الأرضيَّةِ، حيثُ $a_g = 9.832\ m/s^2$.

ب. مدينةِ شيكاغو في الولاياتِ المتَّحدةِ، حيثُ $a_g = 9.803\ m/s^2$.

ج. كركوك في كوردستان، حيثُ $a_g = 9.782\ m/s^2$.

اعتمادُ الزمنِ الدوريِّ لنظامِ الكتلةِ-النابضِ على الكتلةِ وثابتِ النابضِ

لنأخذْ جهازَ الكتلةِ-النابضِ، تبعًا لقانونِ هوك تُحدَّدُ قوةُ الإرجاعِ المؤثِّرةُ في الكتلةِ بإزاحةِ الكتلةِ وثابتِ النابضِ ($\vec{F}_{\text{مرونية}} = -k\vec{x}$). وفي حينِ أن الكتلةَ في هذا النظامِ لا تؤثِّرُ في قوةِ الإرجاعِ، تزيدُ الكتلةُ الثقيلةُ في البندولِ من القوةِ المطبَّقةِ على الكرةِ، وتزيدُ من القصورِ الذاتيِّ للكرةِ. أما الكتلةُ الثقيلةُ المعلَّقةُ بنابضٍ، فإنها تزيدُ من القصورِ الذاتيِّ دون أن تُحدثَ أيَّ تعويضٍ في زيادةِ القوةِ.

وبسببِ هذه الزيادةِ في القصورِ الذاتيِّ، يكونُ للكتلةِ الثقيلةِ تعجيلٌ أقلُّ من تعجيلِ كتلةٍ خفيفةٍ. وبالتالي تستغرقُ الكتلةُ الثقيلةُ زمنًا أطولَ لإكمالِ دورةٍ حركيَّةٍ واحدةٍ. بمعنى آخر، يكونُ للكتلةِ الأثقلِ زمنٌ دوريٌّ أكبرُ. إذًا، كلما زادَتِ الكتلةُ يزدادُ الزمنُ الدوريُّ للاهتزازةِ أيضًا، في غيابِ ازديادٍ معوِّضٍ للقوةِ.

يزدادُ النابضُ قساوةً كلما ازدادَتْ قيمةُ ثابتِه k، مما يتطلَّبُ قوةً أكبرَ لإطالتِه أو ضغطِه. علمًا أن قوةً أكبرَ تسبِّبُ تعجيلاً أكبرَ، وبذلك يقلُّ الزمنُ اللازمُ لدورةٍ كاملةٍ (مفترضين أن السعةَ ثابتةٌ). إذًا، لسعةٍ معيَّنةٍ يستغرقُ النابضُ الأقسى لإكمالِ دورةٍ واحدةٍ زمنًا أقلَّ من نابضٍ أقلَّ قساوةً.

كما في البندولِ، يمكنُ اشتقاقُ معادلةِ الزمنِ الدوريِّ لنظامِ الكتلةِ-النابضِ رياضيًّا أو مختبريًّا.

الزمنُ الدوريُّ لنظامِ الكتلةِ-النابضِ في حركةٍ توافقيَّةٍ بسيطةٍ

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

الزمنُ الدوري = 2π × الجذر التربيعي لـ(الكتلةِ مقسومةً على ثابتِ النابضِ)

تلاحظُ أن تغييرَ سعةِ الاهتزازةِ لا يؤثِّرُ في الزمنِ الدوريِّ، كما في البندولِ البسيطِ. يصحُّ هذا فقط في الأنظمةِ والظروفِ التي يخضعُ فيها النابضُ لقانونِ هوك.



الفيزياءُ والحياة

1. بندولٌ على القمر

يبلغُ تعجيلُ السقوطِ الحرِّ على سطحِ القمرِ حوالي سدسِ قيمتِه على سطحِ الأرض. قارنْ بينَ الزمنِ الدوريِّ لبندولٍ على القمرِ والزمنِ الدوريِّ لبندولٍ مماثلٍ على الأرض.

2. ساعاتٌ حائطٍ بندوليَّةٌ

ما الذي يجعلُ البندولَ جهازَ توقيتٍ صادقًا حتى وإن تضاءلَتْ سعةُ اهتزازاتِهِ تدريجيًّا مع الوقتِ؟

مثال 3 (ج)

الحركةُ التوافقيَّةُ البسيطةُ لنظامِ الكتلةِ-النابض

المسألة

يرتكزُ جسمُ سيّارةٍ كتلتُها 1275 kg على هيكلٍ بأربعةِ نوابض. تحملُ السيّارةُ سائقًا وراكبًا كتلتُهما معًا 153 kg. عندَ مرورِ السيّارةِ فوقَ أخدودٍ في الطريقِ يهتزُّ الهيكلُ بزمنٍ دوريٍّ 0.840 s. افترضْ للثواني الأولى أن الحركةَ توافقيَّةٌ بسيطةٌ. جِدْ ثابتَ النابضِ.

الحلّ

المعطى: $m = \frac{(1275\ \text{kg} + 153\ \text{kg})}{4} = 357\ \text{kg}$ $\quad T = 0.840\ \text{s}$

المجهول: $k = ?$

أستعملُ معادلةَ الزمنِ الدوريِّ لجهازِ الكتلةِ-النابض لحسابِ k.

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

$$T^2 = 4\pi^2\left(\frac{m}{k}\right)$$

$$k = \frac{4\pi^2 m}{T^2} = \frac{4\pi^2(357\ \text{kg})}{(0.840\ \text{s})^2}$$

$$\boxed{k = 2.00 \times 10^4\ \text{N/m}}$$

تطبيق 3 (ج)

الحركةُ التوافقيَّةُ البسيطةُ لنظامِ الكتلةِ-النابض

1. تمَّ تعليقُ كتلٍ مختلفةٍ بنابضٍ ثابتُه 30.0 N/m. جِد الزمنَ الدوريَّ والتردُّدَ للاهتزازةِ التي تُحدثُها كلٌّ من الكتلتَيْن التاليتَيْن:

أ. 2.3 kg.

ب. 15 g.

مراجعةُ القسم 2-3

1. تدلُّ قراءةُ بندولِ الإيقاعِ على عددِ الذبذباتِ في الدقيقةِ. ما الزمنُ الدوريُّ والتردُّدُ لذبذبةِ بندولِ الإيقاعِ إذا تمَّ ضبطُه على 180 ذبذبة في الدقيقة؟

2. يتأرجحُ طفلٌ على أرجوحةٍ طولُ حبلِها 2.5 m.

أ. ما الزمنُ الدوريُّ لحركةِ الطفلِ؟

ب. ما تردُّدُ الاهتزازةِ؟

3. عُلِّقَتْ كتلةٌ 0.75 kg بنابضٍ شاقوليٍ فأطالتْه مسافةَ 0.30 m.

أ. ما ثابتُ النابضِ؟

ب. وُضِعَ النظامُ على سطحٍ أفقيٍّ ليهتزَّ بحركةٍ توافقيَّةٍ بسيطةٍ. ما الزمنُ الدوريُّ للاهتزازةِ؟

4. **تفكيرٌ ناقد:** يهتزُّ نظاما كتلةٍ-نابض بحركةٍ توافقيَّةٍ بسيطةٍ. إذا كانَ ثابتاهما متساويَيْن وكتلةُ أحدِهما ضعفَ كتلةِ الآخرِ، فأيٌّ منهما زمنُه الدوريُّ أكبرُ؟



خصائصُ الموجاتِ
Properties of Waves

3-3 أهداف القسم

- يميّزُ اهتزازاتِ الجُسَيْم من مجملِ الحركةِ الموجيَّةِ الكليَّةِ.
- يفرّقُ بينَ النبضاتِ والموجاتِ الدوريَّةِ.
- يفسّرُ الأشكالَ الموجيَّةَ للموجاتِ المستعرضةِ والطوليَّةِ.
- يطبّقُ العلاقةَ بين سرعةِ الموجةِ وتردُّدِها وطولِها لحلِّ المسائل.
- يربطُ الطاقةَ بسعةِ الموجةِ.

الحركةُ الموجيَّةُ

لنركِّزْ على ما يحدثُ لسطحِ الماءِ في بركةٍ، عندَما تسقطُ حصاةٌ فيها. الاضطرابُ الذي تُحدثُه الحصاةُ يولِّدُ موجاتٍ مائيَّةً تنتقلُ بعيدًا عن نقطةِ الاضطرابِ، كما يظهرُ في **الشكل 3-8**. إذا تفحَّصْتَ حركةَ ورقةِ شجرٍ تطفو على سطحِ الماءِ قريبًا من نقطةِ الاضطرابِ، ترى الورقةَ تتحرَّكُ صعودًا ونزولاً ذهابًا وإيابًا حولَ موقعِها الأصليِّ. لكنها لا تقومُ بأي إزاحةٍ محصَّلةٍ نتيجةَ حركةِ الأمواجِ.

تشيرُ حركةُ الورقةِ إلى حركةِ جسيماتِ الماءِ في مكانِها، كما تفعلُ الورقةُ، لكنَّ جسيماتِ الماءِ لا تنتقلُ عبرَ البركةِ. بمعنى آخرَ، تتحرَّكُ موجةُ الماءِ من مكانٍ إلى آخرَ، لكنَّ الماءَ لا ينتقلُ معها.



الشكل 3-8
يُظهرُ الشكلُ الموجاتِ التي أحدثَتْها حصاةٌ سقطَتْ في بركةٍ.

الموجةُ حركةُ اضطرابٍ

تبدأُ موجاتُ الماءِ حركتَها باضطرابٍ على نقطةٍ معيَّنةٍ في الماءِ. يسبِّبُ هذا الاضطرابُ حركةً للماءِ على السطحِ قريبًا من النقطةِ؛ الحركةُ بدورِها تنقلُ الاضطرابَ إلى نقاطٍ أبعدَ فتجعلُها تتحرَّكُ. بهذه الطريقةِ تنتقلُ الموجاتُ بنمطٍ دائريٍّ بعيدًا عن الاضطرابِ الأصليِّ.

في هذا المثالِ تكونُ المياهُ في البركةِ هي **الوسطُ** medium الذي يعبرُهُ الاضطرابُ، وجسيماتُ الوسطِ، أي جزَيئاتُ الماءِ في هذه الحالةِ، تهتزُّ صعودًا ونزولاً عندَ مرورِ الموجةِ. لاحظْ أن الوسطَ لا ينتقلُ فعليًّا مع الموجةِ. فبعدَ مرورِ الموجةِ تعودُ المياهُ إلى موقعِها الأصليِّ.

الوسط

المادةُ التي يعبرُها الاضطرابُ الموجيُّ.

الموجاتُ، بمعظمِ أنواعِها، تتطلَّبُ وسطًا لتنتقلَ خلالَه. فالموجاتُ الصوتيَّةُ مثلاً لا يمكنُها الانتقالُ في الفضاءِ الخارجيِّ، إذ يلزمُها وسطٌ كالهواءِ أو الماءِ، والموجاتُ التي تحتاجُ إلى وسطٍ ماديٍّ تُسمّى **الموجاتِ الميكانيكيَّةَ** mechanical waves. ليسَتْ جميعُ الموجاتِ بحاجةٍ إلى وسطٍ. فالموجاتُ الكهرومغناطيسيَّةُ، كالضوءِ المرئيِّ وموجاتِ اللاسلكيِّ وأشعةِ X، باستطاعتِها أن تعبرَ الفراغَ. وستتعرَّفُ هذه الموجاتِ الكهرومغناطيسيَّةَ في فصولٍ لاحقةٍ.

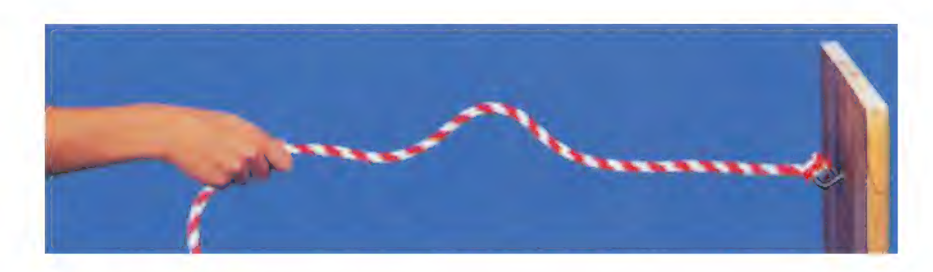
الموجةُ الميكانيكيَّةُ

الموجةُ التي تحتاجُ إلى وسطٍ ماديٍّ تنتقلُ خلالَه.

أنواعُ الموجاتِ

أسهلُ طريقةٍ لتحصلَ على حركةٍ موجيَّةٍ، هي أن تهزَّ بسرعةٍ أحدَ طرفَيّ حبلٍ مشدودٍ ثُبِّتَ طرفُه الآخرُ، كما يظهرُ في **الشكل 3-9**. تُحدثُ حركةُ رسغِك نبضةً تنتقلُ إلى الطرفِ الثابتِ بسرعةٍ محدَّدةٍ.

الاستمرارُ في إحداثِ نبضاتٍ متتاليةٍ على طرفِ الحبلِ يُنتجُ موجةً دوريَّةً. وكلَّما كانَ مولِّدُ الحركةِ الموجيَّةِ دوريَّ الحركةِ، كحركةِ يدِكَ المتكرِّرةِ صعودًا ونزولاً، تكونُ الموجةُ الحاصلةُ موجةً دوريَّةً.

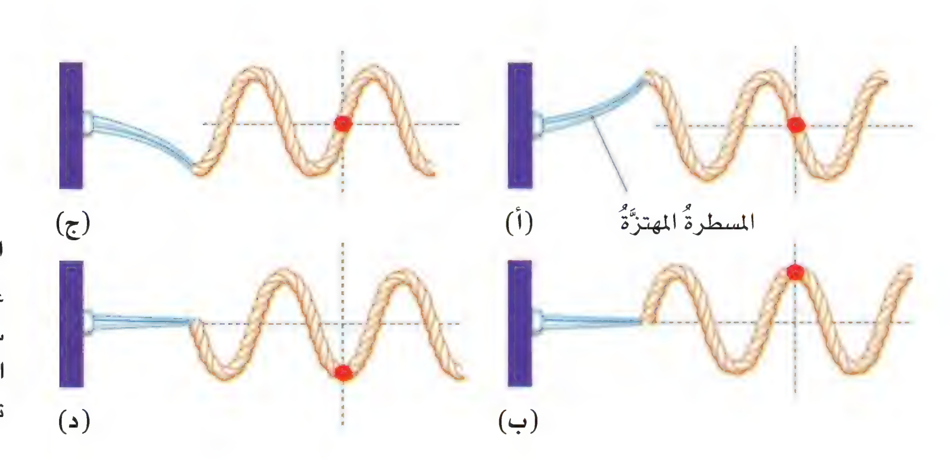


الشكل 3-9
حركةٌ واحدةٌ سريعةٌ يجريها الرسغُ لطرفِ حبلٍ مشدودٍ تحدثُ نبضةً.

الموجاتُ الجيبيَّةُ والجسيماتُ المهتزَّةُ بحركةٍ توافقيَّةٍ بسيطةٍ

يصوِّرُ **الشكلُ 3-10** موجةً دوريَّةً على حبلٍ، سبَّبَتْها مسطرةٌ رقيقةٌ تهتزُّ بحركةٍ توافقيَّةٍ بسيطةٍ. عندَ انتقالِ الموجةِ يمينًا تهتزُّ كلُّ نقطةٍ على الحبلِ صعودًا ونزولاً بحركةٍ توافقيَّةٍ بسيطةٍ، لأن حركةَ المسطرةِ حركةٌ توافقيَّةٌ بسيطةٌ أيضًا. تُسمّى الموجةُ التي يهتزُّ مصدرُها بحركةٍ توافقيَّةٍ بسيطةٍ موجةً جيبيَّةً. هذا يعني أن الموجةَ الجيبيَّةَ حالةٌ خاصَّةٌ للموجةِ الدوريَّةِ التي تكونُ فيها الحركةُ الدوريَّةُ توافقيَّةً بسيطةً. تُسمَّى الموجةُ الظاهرةُ في **الشكل 3-10** موجةً جيبيَّةً، لأن الرسمَ البيانيَّ للدالّةِ الجيبيَّةِ $y = \sin x$ يعطي هذا المنحنى عندَ رسمِه.

إن نظرةً عن قربٍ إلى نقطةٍ منفردةٍ على الحبلِ الظاهرِ في **الشكل 3-10** تبيِّنُ أن حركتَها تشبهُ حركةَ الكتلةِ المعلَّقةِ بنابضٍ يهتزُّ. عندَ انتقالِ الموجةِ يمينًا تهتزُّ كلُّ نقطةٍ حولَ موقعِ اتِّزانِها بحركةٍ توافقيَّةٍ بسيطةٍ. وهذه العلاقةُ بينَ الحركةِ التوافقيَّةِ البسيطةِ والحركةِ الموجيَّةِ تمكِّنُنا من استخدامِ مفرداتٍ ومفاهيمَ من الحركةِ التوافقيَّةِ البسيطةِ في دراستِنا للحركةِ الموجيَّةِ.



الشكل 3-10
عندَ انتقالِ الموجةِ الجيبيَّةِ يمينًا والتي سبَّبَتْها المسطرةُ المهتزَّةُ، تهتزُّ النقطةُ الواحدةُ على الحبلِ صعودًا ونزولاً بحركةٍ توافقيَّةٍ بسيطةٍ.

تعامدُ اهتزازاتِ جسيماتِ الوسطِ في الموجةِ المستعرِضةِ مع اتِّجاهِ حركةِ الموجةِ

يُظهِرُ **الشكل 3-11** (أ) صورةً للموجةِ السابقةِ في **الشكل 3-10** في لحظةٍ زمنيَّةٍ معيَّنةٍ t. عندَما تنتقلُ الموجةُ يمينًا تهتزُّ جسيماتُ الحبلِ في اتِّجاهٍ متعامدٍ مع اتِّجاهِ حركةِ الموجةِ. إن موجةً كتلكَ التي تتحرَّكُ فيها جسيماتُ الوسطِ المضطربِ في اتجاهٍ متعامدٍ مع اتجاهِ حركةِ الموجةِ، تُسمّى **الموجةَ المستعرِضةَ** transverse wave.

الموجةُ المستعرِضةُ

الموجةُ التي تهتزُّ فيها جسيماتُ الوسطِ في اتِّجاهٍ متعامدٍ مع اتِّجاهِ حركةِ الموجةِ.

يمكنُ وضعُ الموجةِ الظاهرةِ في **الشكل 3-11** (أ) في نظامِ إحداثيّاتٍ، كما يظهرُ في **الشكل 3-11** (ب)، وهو ما يُسمّى أحيانًا *الشكلَ الموجيَّ*. يُظهِرُ الشكلُ الموجيُّ إزاحاتِ كلِّ نقطةٍ من الموجةِ في لحظةٍ زمنيَّةٍ، أو إزاحاتِ جسيمٍ واحدٍ مع مرورِ الزمنِ.

في هذه الحالةِ يصوِّرُ الشكلُ الموجيُّ الإزاحاتِ في لحظةٍ واحدةٍ. يمثِّلُ محورُ x وضعَ اتِّزانِ الحبلِ، ويمثِّلُ المحورُ y للمنحنى إزاحةَ كلِّ نقطةٍ من الحبلِ في اللحظةِ t. فالنقاطُ التي يقطعُ عندَها المنحنى محورَ x مثلاً، تكونُ فيها الإزاحةُ صفرًا $(y = 0)$. وبالعكسِ فإن النقاطَ العُليا والدنيا للمنحنى، حيثُ الإزاحةُ القصوى، تكونُ فيها قيمُ y المطلقةُ هي الكبرى.

القمَّةُ والقعرُ والسعةُ والطولُ الموجيُّ

تُسمّى النقطةُ الواقعةُ عندَ أقصى إزاحةٍ موجبةٍ من موقعِ الاتِّزانِ **قمَّةَ الموجةِ** crest، والنقطةُ الواقعةُ عند أقصى إزاحةٍ سالبةٍ من موقعِ الاتِّزانِ **قعر الموجةِ** trough. وكما في الحركةِ التوافقيَّةِ البسيطةِ، فإن سعةَ الموجةِ مقياسٌ لإزاحتِها القصوى من خطِّ الاتِّزانِ. وبما أن المحورَ x يمثِّلُ خطَّ الاتِّزانِ للحبلِ، فإن سعةَ الموجةِ هي مسافةُ القمَّةِ أو القعرِ من خطِّ الاتزانِ، كما يظهرُ في **الشكل 3-11** (ب).

القمَّة

النقطةُ الواقعةُ عند أقصى إزاحةٍ موجبةٍ من موقعِ الاتِّزانِ.

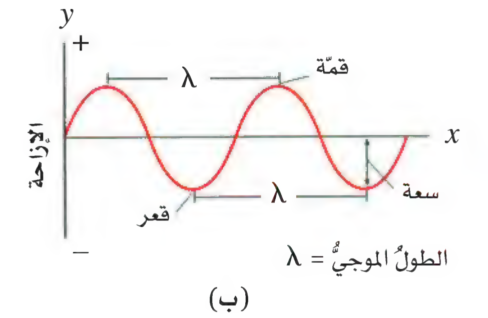
القعر

النقطةُ الواقعةُ عندَ أقصى إزاحةٍ سالبةٍ من موقعِ الاتِّزانِ.

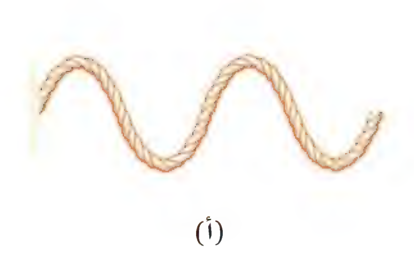
لاحظْ وجودَ سلسلةٍ من القممِ والقعورِ في شكلِ الموجةِ الظاهرِ في **الشكل 3-11** (ب)، وأن المسافةَ بين قمَّتَيْن أو قعرَيْن متتاليَيْن هي نفسُها دائمًا. يُمكنُ إذن تصوُّرُ الموجةِ كحركةٍ دوريَّةٍ. فالجسيمُ في الموجةِ ينتقلُ أولاً في اتجاهٍ معيَّنٍ، ثم في اتجاهٍ آخرَ، ليعودَ أخيرًا إلى موقعِه الاتزانيِّ الأصليِّ استعدادًا للبدءِ بدورةٍ جديدةٍ. والمسافةُ التي تقطعُها الموجةُ خلالَ دورةٍ زمنيَّةٍ واحدةٍ تُسمّى **الطولَ الموجيَّ** wavelength ورمزُها λ (تُلفظُ لَمْدَا). وهي المسافةُ نفسُها التي تفصلُ بين قمَّتَين (إزاحةٌ قصوى موجبةٌ) متتاليتَين أو قعرَيْن (إزاحةٌ قصوى سالبةٌ) متتاليَين. أما الطريقةُ العمليةُ لإيجادِ الطولِ الموجيِّ، فتكونُ بقياسِ المسافةِ بين أي نقطتَين متتاليتَيْن وتتحرَّكانِ بالسرعةِ نفسِها، مقدارًا واتِّجاهًا. لاحظ أن المسافاتِ بين القمَّتَين، أو القعرَيْن المتتاليَيْن في الشكلِ الموجيِّ، متساويةٌ.

الطولُ الموجيُّ

المسافةُ بينَ أي نقطتَيْن متتاليتَيْن تتحرَّكان بالسرعةِ نفسِها، مقدارًا واتِّجاهًا.



(ب)


(أ)

الشكل 3-11

(أ) صورةٌ لموجةٍ مستعرِضةٍ في لحظةٍ ما t يمكن تحويلُها إلى (ب) منحنى حيثُ يمثِّلُ المحورُ x خطَّ اتِّزانِ الحبلِ، ويظهرُ المنحنى إزاحاتِ الحبلِ في زمنٍ t .

تَوازي اهتزازاتِ جُسيماتِ الوسطِ في الموجةِ الطوليَّةِ مع اتِّجاهِ حركةِ الموجةِ

باستطاعتِك أن تحدثَ نوعًا آخرَ من الموجاتِ عبرَ نابضٍ، بعدَ تثبيتِ أحدِ طرفَيْه وتحريكِ طرفِه الآخرِ إلى الأمامِ وإلى الخلفِ، محدثًا مناطقَ انضغاطٍ وتخلخلٍ على طولِ النابض كما يظهرُ في **الشكل 3-12**. وتكونُ إزاحةُ الحلقاتِ في اتِّجاهِ الحركةِ الموجيَّةِ. نستنتجُ أن جسيماتِ الوسطِ الذي تتحرَّكُ عبرَهُ الموجةُ تهتزُّ في اتِّجاهٍ موازٍ لاتِّجاهِ حركةِ الموجةِ.

تخلخل انضغاط تخلخل انضغاط

الشكل 3-12

عندَ انتقالِ الموجةِ يمينًا تتقاربُ الحلقاتُ، ويصبحُ النابضُ مشدودًا في بعضِ المناطق ومرخيًّا في مناطقَ أخرى. بما أن إزاحةَ الحلقاتِ متوازيةٌ مع اتِّجاهِ حركةِ الموجةِ، فالموجةُ طوليَّةٌ.

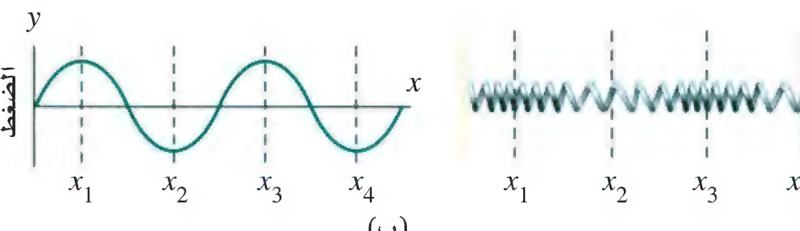
لهذا السببِ تسمّى هذهِ الموجةُ **موجةً طوليَّةً** longitudinal wave. الموجاتُ الصوتيَّةُ في الهواءِ موجاتٌ طوليَّةٌ؛ لأن جسَيمات الهواءِ تهتزُّ إلى الأمامِ وإلى الخلفِ في اتِّجاهٍ موازٍ لاتِّجاهِ حركةِ الموجةِ.

الموجةُ الطوليَّةُ

الموجةُ التي تهتزُّ فيها جسيماتُ الوسطِ في اتِّجاهٍ موازٍ لاتِّجاهِ حركةِ الموجةِ.

يمكنُ أيضًا تمثيلُ الموجةِ الطوليَّةِ الظاهرةِ في **الشكل 3-13** (أ) بالمنحنى الجيبيِّ الظاهرِ في **الشكل 3-13** (ب) حيثُ تتطابقُ مراكزُ مناطقِ الانضغاطِ مع قممِ الشكلِ الموجيِّ، ومراكزُ مناطقِ التخلخلِ مع القعورِ.

يسمّى عادةً هذا النوعُ من المنحنياتِ الظاهرُ في **الشكل 3-13** (ب) *مناطقَ ضغطٍ*، لأن القممَ، حيث انضَغَطَتْ حلقاتُ النابضِ، هي مناطقُ ضغطٍ عالٍ. والقعورَ، حيث تخلخلَتْ حلقاتُ النابضِ، مناطقُ ضغطٍ منخفضٍ.



الشكل 3-13

(أ) الموجةُ الطوليَّةُ في لحظةٍ زمنيَّةٍ t يمكنُ تمثيلُها بالمنحنى (ب). تتطابقُ مراكزُ مناطقِ الانضغاطِ مع قممِ الموجةِ، ومراكزُ مناطقِ التخلخلِ مع قعورِها.

الزمنُ الدوريُّ والتردُّدُ وسرعةُ الموجةِ

لاحظْتَ أن تحريكَ طرفِ النابضِ إلى أعلى وإلى أسفلَ، أو إحداثَ اهتزازاتٍ على مسطرةٍ موصولةٍ بخيطٍ، يولِّدان موجاتٍ عبرَ الخيطِ أو النابضِ. فالموجاتُ الصوتيَّةُ قد تنشأُ من اهتزازاتِ أوتارِكَ الصوتيَّةِ، أو وترِ الكيتارِ، أو رقعةِ الجلدِ المشدودةِ على الطبلةِ. ومولِّدُ الحركةِ الموجيَّةِ في كلِّ هذه الحالاتِ هو الجسمُ المهتزُّ. ولهذا الجسمِ المهتزِّ والمسبِّبِ للمنحنى الجيبيِّ تردُّدٌ مميَّزٌ دائمًا. عندَ انتقالِ الحركةِ إلى الجسيماتِ في الموجةِ، تهتزُّ الجسيماتُ بتردُّدٍ يساوي تردُّدَ اهتزازةِ الجسمِ أو المصدرِ. وعندَما تكملُ الجسيماتُ المهتزَّةُ في الوسطِ اهتزازةً واحدةً، يكونُ قد مرَّ طولٌ موجيٌّ واحدٌ على نقطةٍ معيَّنةٍ. هذا يعني أن اهتزازةً واحدةً تؤدّي إلى تشكيلِ موجةٍ واحدةٍ، وبالتالي يعرَّفُ تردُّدُ الموجةِ بعددِ الموجاتِ التي تمرُّ بنقطةٍ معيَّنةٍ في وحدةِ الزمنِ.

أما الزمنُ الدوريُّ للموجةِ فهو الزمنُ اللازمُ لاهتزازةٍ كاملةٍ لجسيماتِ الوسطِ. وبما أن حدوثَ اهتزازةٍ كاملةٍ يعني مرورَ طولٍ موجيٍّ واحدٍ بنقطةٍ معيَّنةٍ من الموجةِ، فإن الزمنَ الدوريَّ هو الزمنُ الذي يستغرقُه مرورُ طولٍ موجيٍّ واحدٍ بتلك النقطةِ. وتُطبَّقُ على الموجاتِ علاقةُ الزمنِ الدوريِّ بالتردُّدِ، حيثُ يتناسبُ الزمنُ الدوريُّ عكسيًّا مع التردُّدِ.

العلاقةُ بينَ سرعةِ الموجةِ والتردُّدِ والطولِ الموجيِّ

نستطيعُ الآنَ اشتقاقَ تعبيرِ سرعةِ الموجةِ بدلالةِ زمنِها الدوريِّ أو تردُّدِها. نعلمُ أن السرعةَ تساوي الإزاحةَ مقسومةً على الزمنِ اللازمِ لتلك الإزاحةِ:

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

في الموجاتِ، تكونُ الإزاحةُ التي تحدثُ خلالَ فترةٍ زمنيَّةٍ بطولٍ موجيٍّ واحدٍ (λ)، مساويةً لزمنٍ دوريٍّ واحدٍ للاهتزازةِ (T).

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

درسْنا من قبلُ في هذا الفصلِ أن علاقةَ التردُّدِ بالزمنِ الدوريِّ علاقةٌ عكسيَّةٌ.

$$f = \frac{1}{T}$$

نعوِّضُ التردُّدَ في معادلةِ السرعةِ لِنحصُلَ على معادلةٍ جديدةٍ لسرعةِ الموجةِ.

$$v = \frac{\lambda}{T} = f\lambda$$

سرعةُ الموجةِ

$$v = f\lambda$$

سرعةُ الموجة = التردُّد × الطول الموجي

تُعدُّ سرعةُ الموجةِ الميكانيكيَّةِ ثابتةً بالنسبةِ إلى كلِّ وسطٍ معيَّنٍ. فموجاتُ الصوتِ الصادرةُ عن أدواتٍ موسيقيَّةٍ مختلفةٍ، مثلاً، تصلُ إلى آذانِنا في اللحظةِ نفسِها، مع أن تردُّداتِ موجاتِها مختلفةٌ. إذًا بالرغمِ من اختلافِ التردُّداتِ والأطوالِ الموجيَّةِ للموجاتِ الصادرةِ عن كلِّ أداةٍ، فإن حاصلَ ضربِ الكمّيتَيْن يبقى دائمًا نفسَه عند درجةِ الحرارةِ نفسِها.

نتيجةً لذلك، يؤدّي ازديادُ تردُّدِ الموجةِ إلى نقصانِ طولِها، وتبقى سرعتُها ثابتةً. تتغيَّرُ سرعةُ الموجةِ فقط، عندَما تنتقلُ الموجةُ من وسطٍ إلى وسطٍ آخرَ مختلف، أو عندَما تتغيَّرُ خصائصُ معيَّنةٌ للوسطِ (كالحرارة) الذي تتحرَّكُ فيه.

هل تعلم؟

تردُّداتُ الموجاتِ الصوتيَّةِ المسموعةِ تراوحُ بين 20 Hz و 20 000 Hz. أمــا المـوجــاتُ الكهرومغناطيسيَّةُ فلها مجالٌ تردُّديٌّ أوسَعُ، إذ يبدأُ من حوالي 10^4 Hz أو أقــلَّ، ويصــلُ إلى 10^{25} Hz بل أكثر.

مثال 3 (د)

سرعةُ الموجةِ

المسألة

يهتزُّ وترٌ بتردُّدِ 264 Hz. افترضْ أن سرعةَ الصوتِ في الهواءِ 343 m/s، ما الطولُ الموجيُّ للموجةِ التي يصدرُها الوترُ؟

الحـلّ

المعطى: $v = 343\ m/s$ $f = 264\ Hz$

المجهول: $\lambda = ?$

أستعملُ معادلةَ السرعةِ بدلالةِ التردُّدِ والطولِ الموجيِّ.

$$v = f\lambda$$

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{343\ m/s}{264\ Hz} = \frac{343\ m\ s^{-1}}{264\ s^{-1}}$$

$$\lambda = \boxed{1.30\ m}$$

تطبيق 3 (د)

سرعةُ الموجةِ

1. تبلغُ سرعةُ جميعِ الموجاتِ الكهرومغناطيسيَّةِ في الفضاءِ الفارغِ 3.00×10^8 m/s. جِد الطولَ الموجيَّ تبعًا للتردُّداتِ التاليةِ:
   أ. موجاتِ اللاسلكيِّ بتردُّدِ 88.0 MHz.
   ب. الضوءِ المرئيِّ بتردُّدِ 6.0×10^8 MHz.
   ج. أشعَّةِ X بتردُّدِ 3.0×10^{12} MHz.
2. تُصدرُ شوكةٌ رنَّانةٌ صوتًا بتردُّدِ 256 Hz وطولٍ موجيٍّ 1.35 m في الهواءِ.
   أ. ما سرعةُ انتشارِ الصوتِ الصادرِ عن الشوكةِ في الهواءِ؟
   ب. ما الطولُ الموجيُّ للصوتِ الصادرِ عن الشوكةِ في الماءِ، حيث تبلغُ سرعةُ الصوتِ 1500 m/s؟

الموجةُ تنقلُ الطاقةَ

أسقطْ حصاةً في بركةِ ماءٍ، تلاحظْ أن الموجةَ التي تشكَّلَتْ تحملُ كمّيَّةً معيَّنةً من الطاقةِ. عند انتشارِ الموجةِ في أنحاءِ البركةِ، تنتقلُ الطاقةُ خلالَ البركةِ أيضًا. فالموجةُ إذن تنقلُ الطاقةَ من مكانٍ إلى مكانٍ آخر في البركةِ، بينَما تبقى المياهُ في مكانِها فعليًّا. نستنتجُ أن الموجاتِ تنقلُ الطاقةَ من خلالِ نقلِ طاقةِ الجسيماتِ لا الجسيماتِ نفسِها. لهذا السببِ تستطيعُ الموجاتُ في العادةِ نقلَ الطاقةِ بفاعليَّةٍ.

إن وتيرةَ نقل الطاقةِ يعتمدُ على سعةِ الاهتزازةِ لجسيماتِ الوسطِ الذي تنتقلُ فيه الموجةُ. عندَما تزدادُ سعةُ الموجةِ تزدادُ كمّيَّةُ الطاقةِ التي تحملُها في فترةٍ زمنيَّةٍ معيَّنةٍ، علمًا أن الطاقةَ المنقولةَ عبرَ الموجاتِ الميكانيكيَّةِ تتناسبُ طرديًّا مع مربَّعِ سعةِ الموجةِ. أي عندَ مضاعفةِ سعةِ الموجةِ، تزدادُ الطاقةُ أربعةَ أمثالٍ، والعكسُ صحيحٌ، أي عندَ نقصانِ سعةِ الموجةِ إلى النصفِ، تتناقصُ كمّيَّةُ الطاقةِ إلى ربعِ قيمتِها السابقةِ.

وكما في نظامِ الكتلة – النابض أو البندولِ البسيطِ، تتناقصُ سعةُ الموجةِ تدريجيًّا بمرورِ الزمنِ، بسببِ *ضياعِ الطاقةِ*. ولتبسيطِ الدراسةِ، سنتجاهلُ هذا التأثيرَ في معالجتِنا للحركاتِ الموجيَّةِ.

مراجعةُ القسم 3-3

1. عندَ مرورِ الموجِ بطائرِ بطٍّ عائمٍ في بحيرةٍ، يتحرَّكُ البطُّ إلى أعلى وإلى أسفلَ، لكنَّه يبقى في موقعِه. لماذا لا تنقلُ الموجةُ البطَّ على طولِ خطِّ انتشارِها؟

2. ارسمْ شكلَ كلٍّ من الموجاتِ التاليةِ، كما تظهرُ على نابضٍ:

أ. نبضةٍ طوليَّةٍ.

ب. موجةٍ دوريَّةٍ طوليَّةٍ.

ج. نبضةٍ مستعرِضةٍ.

د. موجةٍ دوريَّةٍ مستعرِضةٍ.

3. ارسمْ بيانيًّا كلاًّ من الموجتَيْن الواردتَيْن في البندَيْن (ب) و (د) في السؤال 2، ورمِّزِ الإحداثيَّ y بالمتغيِّرِ المناسبِ، ثم حدِّدْ على الرسمِ كلاًّ مما يلي: القمَّةَ والقعرَ والطولَ الموجيَّ والسعةَ.



القسم 3-4

التفاعلاتُ الموجيَّةُ

Wave Interactions

3-4 أهداف القسم

- يطبِّقُ مبدأَ التراكبِ.
- يميِّزُ بينَ التداخلِ البنّاءِ والتداخلِ الإتلافي.
- يتوقَّعُ متى تنقلبُ الموجةُ المنعكسةُ.
- يتوقَّعُ إن كانتْ هناك موجاتٌ محدَّدةٌ متنقِّلةٌ تشكِّلُ موجةً واقفةً.
- يحدِّدُ عُقَدَ موجةٍ واقفةٍ وبطونَها.

التداخلُ الموجيُّ

عندما يتصادمُ قاربا صدمٍ كما يظهرُ في **الشكل 3-14** يرتدُّ كلٌّ منهما إلى الوراءِ في اتِّجاهٍ مختلفٍ. بما أنَّهما لا يستطيعانِ أن يشغلا الحيِّزَ نفسَه فهما مضطرانِ إلى تغييرِ اتِّجاهِ حركتِهما. لا ينطبقُ ذلك على القواربِ الصدميَّةِ فحسبُ، بل على جميعِ الأجسامِ المادِّيَّةِ. فجسمانِ ماديَّان مختلفان لا يشغلان أبدًا الحيِّزَ نفسَه في الوقتِ نفسِه.



الشكل 3-14

لا يستطيعُ قاربان صدميَّان أن يكونا في المكانِ نفسِه في الوقتِ نفسِه. لكن تستطيعُ موجةٌ أن تتقاطعَ مع موجةٍ أخرى دون أن تتأثَّرَ أيٌّ منهما.

لكن عندَ الاستماعِ إلى أصواتٍ تصدرُ في الوقتِ نفسِه من مصادرَ مختلفةٍ نستطيعُ أن نميِّزَ بينها، هذا يعني أنه عندما تلتقي موجتان، فإنهما لا ترتدَّان إلى الوراءِ كما ارتدَّ القاربانِ الصدميَّان، أي إن الموجاتِ الصوتيَّةَ تحتلُّ الحيِّزَ نفسَهُ حين تتقاطعُ في المكانِ نفسِه وفي اللحظةِ نفسِها. يُسمّى تجمُّعُ الأمواجِ المتداخلةِ *تراكُبًا* superposition.

يُظهرُ **الشكلُ 3-15** مجموعتَيْن من الموجاتِ المائيَّةِ في حوضِ الأمواجِ، حيث تنتشرُ الموجاتُ، عند ابتعادِها عن مصدرِها، فيمرُّ بعضُها خلالَ بعضٍ. وعندَما يحدثُ ذلك تتفاعلُ الموجاتُ لتشكِّلَ *نمطًا تداخليًّا* من خطوطٍ مضيئةٍ ومظلمةٍ.



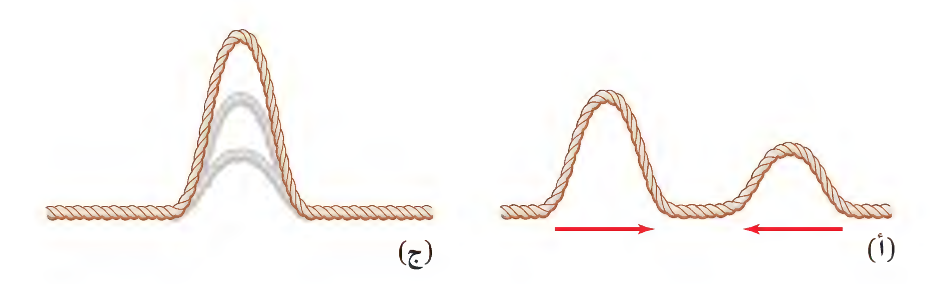
الشكل 3-15

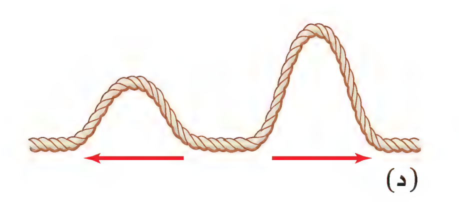
يوضحُ حوضُ الأمواجِ تداخلَ الموجاتِ المائيَّةِ.

بالرغمِ من الوضوحِ في ملاحظةِ تراكبِ الموجاتِ الميكانيكيَّةِ، فإنها ليسَتِ النوعَ الوحيدَ من الموجاتِ الذي يعبرُ المكانَ نفسَه في الوقتِ نفسِه. فالضوءُ المرئيُّ وأشكالٌ أخرى من الأشعَّةِ الكهرومغناطيسيَّةِ تتراكبُ أيضًا وتتفاعلُ محدثةً أنماطًا تداخليَّةً.

حدوثُ التداخلِ البنّاء من إزاحاتِ الجسيمات في الاتّجاهِ نفسِه

يُظهرُ **الشكلُ 3-16** (أ) نبضتَيْن موجيتَيْن تتحرَّكُ إحداهُما في اتِّجاهِ الأُخرى عبرَ حبلٍ مشدودٍ. تتَّجهُ النبضةُ الكبرى يمينًا، بينما تتَّجهُ النبضةُ الصغرى يسارًا، وتتكوَّنُ نبضةٌ محصِّلةٌ لحظةَ التقائِهما، كما في **الشكلِ 3-16** (ب).





(ب)

الشكل 3-16

عندما تلتقي النبضتانِ الظاهرتانِ في الشكلِ، تُجمعُ الإزاحتانِ على كلِّ نقطةٍ لتشكِّلا نبضةً محصِّلةً. وهذا مثالٌ على التداخلِ البنّاء.

على كلِّ نقطةٍ من الحبلِ، تمَّ جمعُ إزاحتَي الجسيمِ في الوسطِ الناتجِ عن النبضتَيْن، وكانَتِ النتيجةُ إزاحةَ الجسيمِ المحصِّلة. فعندما تلتقي موجتان أو أكثرُ عند نقطة معيّنة، فإن إزاحةَ جسيماتِ الوسطِ تساوي مجموعَ إزاحاتِ الجسيماتِ الناتجةِ عن كلِّ موجةٍ، ويصحُّ تطبيقُ ذلك على جميعِ أنواعِ الموجاتِ الميكانيكيَّةِ والكهرومغناطيسيَّة. ويُسمّى هذا **مبدأ التراكبِ** superposition principle في الموجاتِ. فكما هو ملاحظٌ في **الشكل 3-16** (ج) حيث تتطابقُ النبضتانِ تمامًا، فإن سعةَ النبضةِ المحصِّلةَ تساوي حاصلَ جمعِ سعتَي النبضتَيْن. مع العلم أن التجاربَ تُظهرُ صلاحيَّةَ تطبيقِ مبدأ التراكبِ فقطْ حين تكونُ سعةُ الموجاتِ المنفردةِ صغيرةً. وهو الافتراضُ المتَّبعُ في جميعِ أمثلةِ الفصلِ.

لاحظْ أن شكلَ النبضتَيْن لم يتغيَّرْ بعد أن التقيَتا وجاوَزتْ إحداهُما الأخرى. وقد حافظَتْ كلٌّ منهما على اتِّجاهِ حركتِها السابقةِ، كما يظهرُ في **الشكل 3-16** (د). تصحُّ هذه الميزةُ في الموجاتِ الصوتيَّةِ، والموجاتِ المائيَّةِ، والموجاتِ الضوئيَّةِ، وأنواعٍ أخرى من الموجاتِ. وتحافظُ كل موجةٍ على ميزاتِها الخاصّةِ بعد التداخلِ، تمامًا كما حدثَ للنبضتَيْن في المثالِ السابقِ.

رأيْنا، عندَ التقاءِ أكثرَ من موجةٍ منتقلةٍ في المكانِ نفسِه، كما في **الشكل 3-16**، أن الموجةَ المحصِّلةَ هي مجموعُ إزاحاتِ جسيماتِ الوسطِ نحوَ الجهةِ نفسِها، عن موقعِ الاتّزانِ، حيث تكونُ إزاحةُ الموجةِ المحصِّلةُ أكبرَ من كلِّ إزاحةٍ منفردةٍ. ويُسمّى ذلك **تداخلاً بنّاءً** constructive interference.

مبدأُ تراكبِ الموجات

عندَما تلتقي موجتان أو أكثرُ في وسطٍ واحدٍ، فإن إزاحةَ جسيماتِ الوسطِ تساوي مجموعَ إزاحاتِ الجسيماتِ الناتجةِ عن كلِّ موجةٍ على حدةٍ.

التداخلُ البنّاءُ

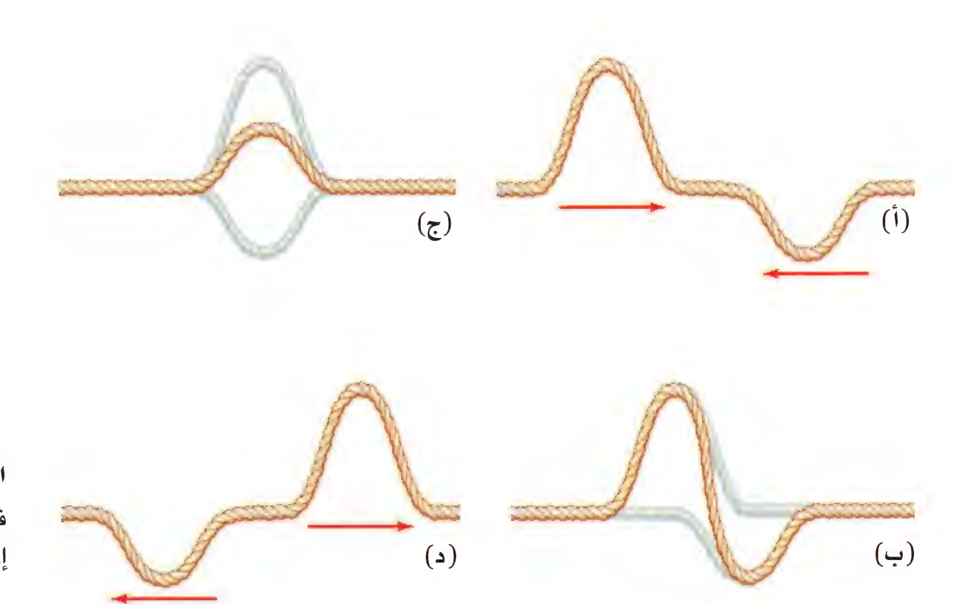
التداخلُ الذي يحدثُ عندَ التقاءِ إزاحاتِ الوسطِ التي تقعُ في الجهةِ نفسِها من موقعِ الاتّزانِ لتشكِّلَ إزاحةً محصِّلةً أكبرَ من كلِّ إزاحةٍ منفردةٍ لكلِّ جسيمٍ.

حدوثُ التداخل الإتلافيِّ (الأضعاف) من إزاحاتٍ الجسيمات في اتّجاهاتٍ متعاكسةٍ

ماذا سيحدُثَ لو أنَّ النبضتَيْن كانتا على جهتَيْن متعاكستَيْن من موقعِ الاتِّزانِ، كما يظهرُ في **الشكل 3-17** (أ)؟ في هذه الحالةِ تكونُ للإزاحتَيْن إشارتانِ مختلفتان، إحداهما موجبةٌ والأُخرى سالبةٌ. وعندَ جمعِ إزاحةٍ موجبةٍ مع إزاحةٍ سالبةٍ، كما يظهرُ في **الشكل 3-17** (ب) و **3-17** (ج)، تكونُ النبضةُ المحصِّلةُ حاصلَ الفرقِ بين النبضتَيْن، ويؤدّي ذلك إلى ما يُسمّى **تداخلاً إتلافيًا** destructive interference. بعدَ انفصالِ النبضتَيْن، تحافظان على شكلَيْهما، كما يظهرُ في **الشكل 3-17** (د).

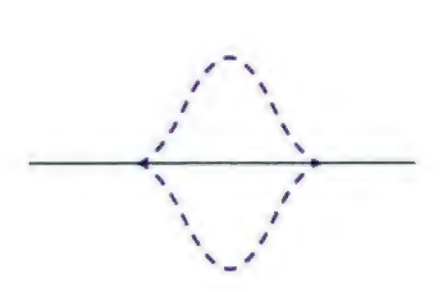
التداخلُ الإتلافيُّ (الأضعاف)

تداخلٌ يحدثُ عندَ التقاءِ إزاحتَيْن متعاكستَيْن لجسيمٍ معيّنٍ في الوسط، لتشكّلَ إزاحةً محصِّلةً أصغرَ من الإزاحةِ المنفردةِ لكلِّ جسيمٍ.



الشكل 3-17
في حالةِ التداخلِ الإتلافي هذه، تُطرحُ إزاحةُ نبضةٍ من إزاحةِ الأخرى.

يُظهرُ **الشكلُ 3-18** نبضتَيْن متساويتَي السعةِ، لكن بإزاحتَيْن متعاكستَيْن في الإشارةِ. عندما تتطابقُ النبضتانِ وتُجمعُ الإزاحتان، تكونُ إزاحةُ الموجةِ المحصِّلةُ صفرًا. ويعني هذا أن النبضتَيْن قد ألغَتْ إحداهُما الأُخرى، وكأنه لم يحدثْ أيُّ اضطرابٍ في تلك اللحظةِ التي تراكبَت فيها النبضتان. يؤدّي ذلك إلى ما يُسمّى *تداخلاً إتلافيًّا كاملاً*.



الشكل 3-18
الإزاحةُ المحصِّلةُ على كلِّ نقطةٍ من الحبلِ صفرٌ، حيثُ تُلغي النبضتانِ إحداهُما الأخرى بتداخلٍ إتلافي كاملٍ.

إذا كانَتِ الموجتانِ مائيَّتَيْن تحاولُ إحداهُما جذبَ قطرةِ الماءِ إلى أعلى. وفي الوقتِ نفسِه تحاولُ الموجةُ الأخرى وبالقوَّةِ نفسِها جذبَ القطرةِ إلى أسفلَ. وتكونُ النتيجةُ غيابَ أيِّ قوَّةٍ محصِّلةٍ على القطرةِ، مما يعني غيابًا تامًّا لحركةِ المياهِ في تلك اللحظةِ.

تناولَتِ الدراسةُ، حتى الآن، التداخلَ الحاصلَ نتيجةَ نبضتَيْن مستعرضتَيْن، علمًا أن مبدأ التراكبِ يُطبَّقُ أيضًا على الموجاتِ الطوليَّةِ. فبينما يتعلَّقُ *الانضغاطُ* بقوةٍ مؤثِّرةٍ على الجسَيمِ في اتِّجاهٍ معيَّنٍ يحدثُ *التخلخلُ* نتيجةَ تأثيرِ القوَّةِ في الجسَيمِ نفسِه، لكن في اتجاهٍ معاكسٍ. إذًا، عند تداخلِ الانضغاطِ والتخلخلِ يكونُ التداخلُ إتلافيًّا ومقدارُ القوةِ المحصِّلةِ على الجسَيمِ قد نقصَ.

تناولْنا دراسةَ التداخلَيْن البنّاءِ والإتلافيِّ بشكلٍ منفصلٍ، وحصرْنا الدراسةَ في النبضاتِ. عند استعمالِ الموجاتِ الدوريَّةِ تتشكَّلُ أنماطٌ معقَّدةٌ تتضمَّنُ مناطقَ تداخلٍ بنّاءٍ وإتلافيٍّ على نقاطٍ مختلفةٍ، علمًا أن مواقعَ هذه المناطقِ قد تتغيَّرُ مع الزمنِ.

انعكاس الموجات

افترضْنا، في عرضِنا لهذا الموضوعِ، أنَّ الموجاتِ المنتقلةَ التي يتمُّ تحليلُها تستطيعُ التحرُّكَ إلى ما لا نهايةٍ، ما لم تصطدمْ بعائقٍ قد يوقفُها أو يغيِّرُ اتِّجاهَ حركتِها. ماذا يحدثُ لحركةِ الموجةِ عندَ وصولِها إلى طرفِ الوسطِ الذي تعبُرُه؟

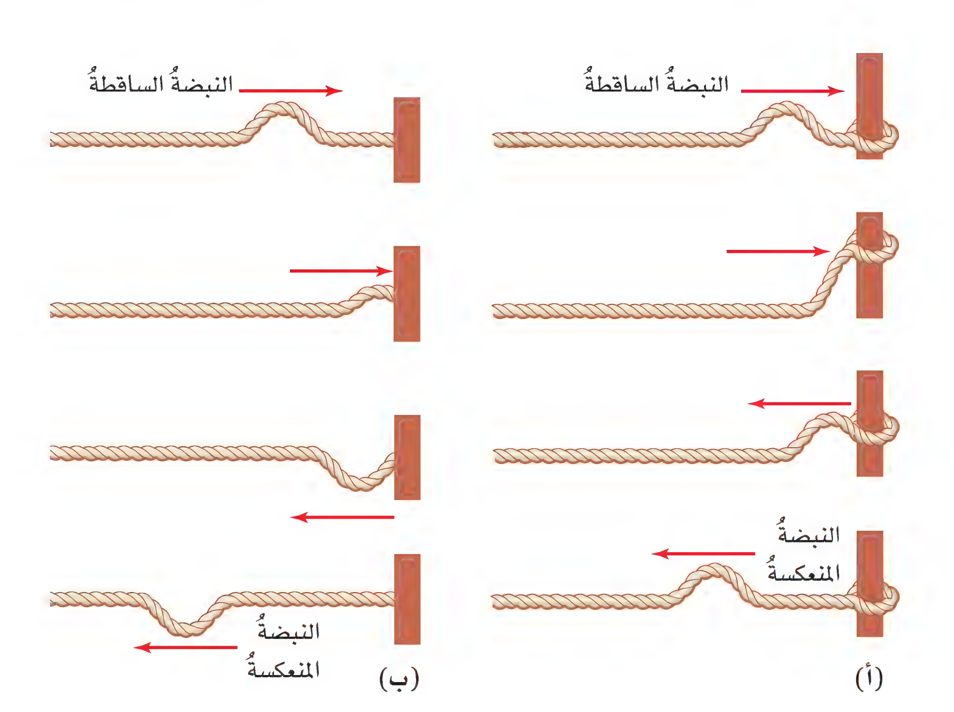
انعكاسُ الموجاتِ على الطرفِ الطليقِ (الحرِّ)

لنفترضْ نبضةً منتقلةً عبرَ حبلٍ مشدودٍ يشكِّلُ طرفُه حلقةً لااحتكاكيَّةً حولَ حاجزٍ ثابتٍ، كما يظهرُ في **الشكل 3-19** (أ).

عندَ انتقالِ النبضةِ يمينًا في اتِّجاهِ الطرفِ الآخرِ للحبلِ، نلاحظُ أن كلَّ نقطةٍ من الحبلِ تهتزُّ مرَّةً إلى أعلى ثم إلى أسفلَ، حتى تصلَ النبضةُ إلى الطرفِ الطليقِ، فيهتزُّ حاملاً الحلقةَ معه إلى أعلى، تعودُ بعدَها الحلقةُ إلى موقعِها السابقِ. حركةُ النبضةِ عند الحلقةِ تشبهُ الحركةَ التي كانت تحدث لو أن أحدًا يقومُ بتحريكِ الحبلِ إلى الأعلى لكي يرسلَ نبضة علوية نحو اليسار. يسبِّبُ ذلك ارتدادًا للنبضة، فتنتقلُ في الاتِّجاهِ المعاكسِ لاتِّجاهِها الأصليِّ. نسمّي النبضة المرسلة النبضة الساقطة، والنبضة المرتدَّةَ النبضة المنعكسةَ، كما نسمّي ارتدادَ النبضةِ المرسلةِ انعكاسًا. لاحظْ أن النبضة المنعكسةَ هي نبضة علوية لها سعة الموجة الساقطة نفسها.

انعكاسُ الموجاتِ مقلوبةً على الطرفِ الثابتِ

لنأخذِ الآنَ نبضةً منتقلةً عبرَ حبلٍ مشدودٍ ثُبِّتَ طرفُه، كما يظهرُ في **الشكل 3-19** (ب). عندَ وصولِها يطبّقُ الحبلُ على الحاجزِ قوةً إلى أعلى. وبدوره يطبّقُ الحاجزُ على الحبلِ قوّةَ ردِّ فعلٍ مساويةً ومعاكسةً. تسبِّبُ هذه القوةُ المتَّجهةُ إلى أسفلَ إزاحةً على الحبلِ في الاتِّجاهِ المعاكسِ لإزاحةِ النبضةِ الأصليَّةِ. ينتجُ عنها بعد الانعكاسِ نبضةٌ مقلوبةٌ.



الشكل 3-19
(أ) لدى إرسالِ نبضةٍ عبرَ حبلٍ طرفُهُ طليقٌ، تنعكسُ النبضةُ عندَ الطرفِ. (ب) ولدى إرسالِها عبرَ حبلٍ طرفُهُ مثبَّتٌ، تنقلبُ النبضةُ المنعكسةُ.

الموجاتُ الواقفةُ

لنأخذْ خيطًا ونربطْ طرفَه بحاجزٍ ثابتٍ. ولنحرِّكْ طرفَه الآخرَ إلى أعلى وإلى أسفلَ بشكلٍ منتظمٍ. تُحدثُ هذه الحركةُ المنتظمةُ موجاتٍ ذاتَ تردُّدٍ معيَّنٍ وطولٍ موجيٍّ وسعةٍ عند انتقالِها على طولِ الخيطِ. عندَ وصولِ الموجاتِ إلى طرفِ الخيطِ، ترتدُّ عبرَ الخيطِ في الاتِّجاهِ المعاكسِ، لتلتقيَ الموجاتِ الساقطةَ وتتداخلَ معها، مسبِّبةً اهتزازًا للخيطِ. عند اهتزازِ الخيطِ بتردُّدٍ معيَّنٍ يحدثُ نمطٌ موجيٌّ يظهرُ ساكنًا ويُسمّى **الموجةَ الواقفةَ** standing wave. تتألَّفُ الموجةُ الواقفةُ من مناطقَ متعاقبةٍ من التداخلاتِ البنّاءةِ والإتلافية.

الموجةُ الواقفةُ

نمطٌ موجيٌّ ينتجُ عن تداخلِ موجتَيْن لهما التردُّدُ والطولُ الموجيُّ والسعةُ نفسُها وتنتقلانِ في اتجاهَيْن متعاكسَيْن في وسط محدود.

العقدة

نقطةٌ في موجةٍ واقفةٍ، يحدثُ دائمًا عندَها تداخلٌ إتلافي كامل وهي ساكنةٌ.

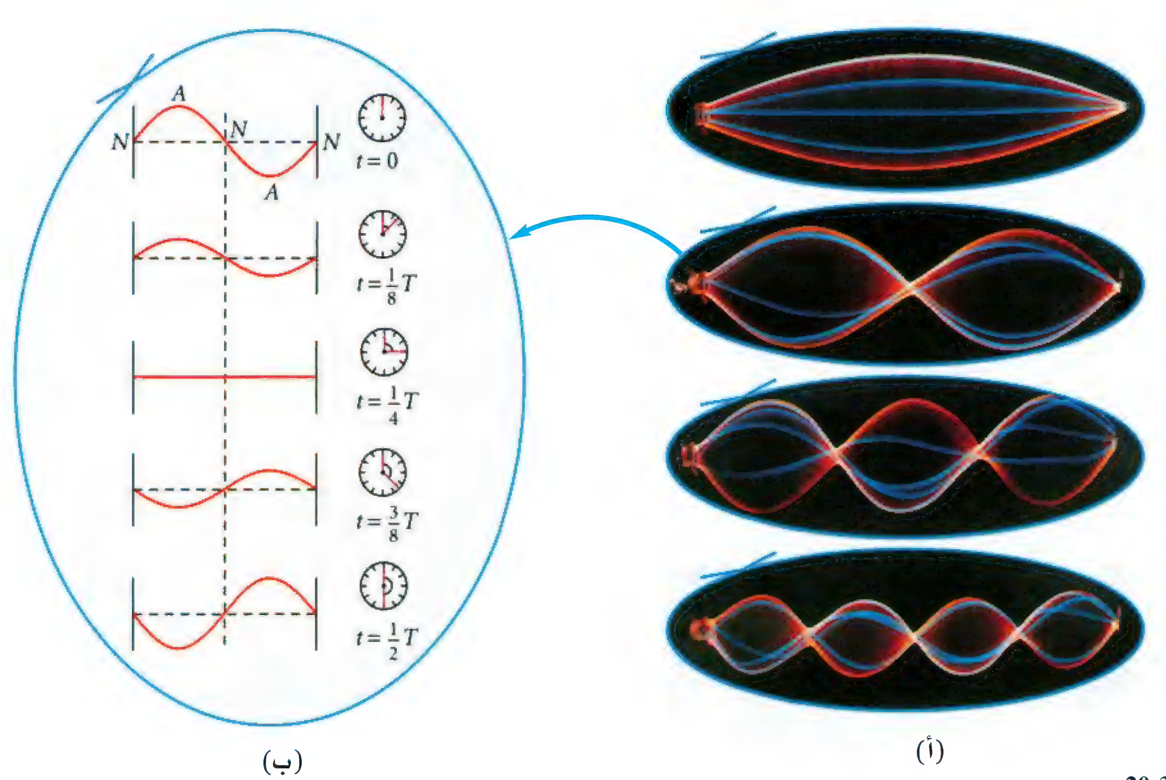
البطن

نقطةٌ في موجةٍ واقفةٍ، تقعُ في منتصفِ المسافةِ بين عقدتَيْن. وعندَها تبلغُ السعةُ أقصاها.

الموجاتُ الواقفةُ ذاتُ عقدٍ وبطونٍ

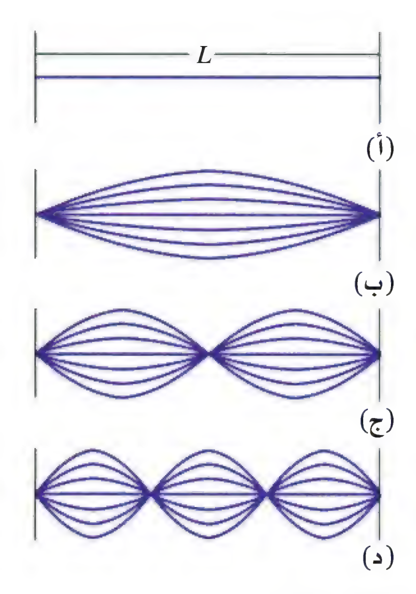
يُظهرُ **الشكل 3-20** (أ) أربعَ موجاتٍ واقفةٍ محتملةٍ على طولِ خيطٍ معيَّنٍ. النقاطُ الساكنةُ التي تُلغى فيها الموجتان تُسمّى **عقدًا** nodes. والنقاطُ الواقعةُ في منتصفِ الطريقِ بين عقدتَيْن متتاليتَيْن، والتي يهتزُّ فيها الخيطُ بأقصى سعةٍ، تُسمّى **بطونًا** antinodes.

يُظهرُ **الشكل 3-20** (ب) ذبذبةَ الحالةِ الثانيةِ **للشكل 3-20** (أ) خلالَ نصفِ دورةٍ. جميعُ النقاطِ على الخيطِ تهتزُّ رأسيًّا بالتردُّدِ نفسِه، ما عدا العقدَ التي تبقى ساكنةً. في هذه الحالةِ توجدُ ثلاثُ عقدٍ (N) وبطنانِ (A)، كما يظهرُ في الشكلِ. تلاحظُ أنَّ لنقاطٍ مختلفةٍ على الخيطِ سعاتٍ مختلفةً.



الشكل 3-20

(أ) تُظهرُ الصورةُ أربعَ موجاتٍ واقفةٍ محتملةٍ موجودةٍ على خيطٍ معيَّنٍ. (ب) يظهرُ الشكلُ تعاقبَ الموجةِ الواقفةِ الثانيةِ لنصفِ دورةٍ.



الشكل 3-21
هناك تردُّداتٌ معيَّنةٌ، فقطْ لاهتزازاتِ تُحدثُ موجاتٍ واقفةً على خيطٍ ثابتٍ. يعتمدُ الطولُ الموجيُّ لهذه الموجاتِ على طولِ الخيطِ. الأطوالُ الموجيَّةُ المحتملةُ تشملُ $2L$ (ب) و L (ج) و $\frac{2}{3}L$ (د).

من الملاحظِ أن هناكَ تردُّداتٍ معيَّنةً، لاهتزازاتٍ تُنتجُ أنماطًا موجيَّةً واقفةً فقط. تظهرُ في **الشكل 3-21** ثلاثُ موجاتٍ واقفةٍ محتملةٍ، على طولِ خيطٍ معيَّن. في كل حالةٍ، تمثِّلُ المنحنياتُ موقعَ الخيطِ في لحظاتٍ زمنيَّةٍ مختلفةٍ. وعندَ هزِّ الخيطِ بسرعةٍ تتداخلُ مواقعُ الخيطِ بشكلٍ غيرِ واضحٍ لتشكِّلَ بطونًا كتلك التي تظهرُ في الشكلِ. ويكونُ البطنُ قمَّةً أو قعرًا، بينَما يمثِّلُ البطنانِ قمةً وقعرًا، أو طولاً موجيًّا واحدًا.

يشكِّلُ طرفا الخيطِ الحاملِ لموجاتٍ واقفةٍ عقدتَيْن، لأنهما لا يهتزّان. وكما يظهرُ في **الشكل 3-21** بإمكانِنا إحداثُ موجاتٍ واقفةٍ لأيِّ طولٍ موجيٍّ يسمحُ لطرفَي الخيطِ أن يكونا عقدتَيْن. إحدى تلك الحالاتِ المحتملةِ تظهرُ في **الشكل 3-21** (ب) وتتألَّفُ من بطنٍ واحدٍ، إما قمَّةٍ وإما قعرٍ، وعقدتَيْن. ولهذه الموجةِ نصفُ طولٍ موجيٍّ. أما الطولُ الموجيُّ فيكونُ مساويًا لمثلَي طولِ الخيطِ ($2L$).

أما الموجةُ الواقفةُ المحتملةُ، الظاهرةُ في **الشكل 3-21** (ج)، فلها ثلاثُ عقدٍ: واحدةٌ على كلِّ طرفٍ وواحدةٌ في النصفِ، ويوجدُ في هذه الحالةِ بطنانِ، أي قعرٌ وقمَّةٌ. ويكونُ الطولُ الموجيُّ مساويًا طولَ الخيطِ (L). والحالةُ الأخيرةُ في **الشكل 3-21** (د) تمثِّلُ موجةً واقفةً يساوي طولُها $2/3L$ وهكذا... علمًا أن الأطوالَ الموجيَّةَ الواقعةَ بين القيَمِ الظاهرةِ في الشكلِ لا تشكِّلُ موجاتٍ واقفةً، لأنها لا تسمحُ بإحداثِ عقدتَيْن على طرفي الخيطِ المربوطِ.

مراجعةُ القسم 3-4

1. تتداخلُ موجةٌ سعتُها $0.30\ m$ مع موجةٍ ثانيةٍ سعتُها $0.20\ m$ لهما نفس الاتّجاه. أكبرُ إزاحةٍ محصِّلةٍ قد تنتجُ؟

2. رُبطَ خيطٌ من أحدِ طرفَيْه بحاجزٍ ربطًا مُحكمًا، وأُرسلَتْ نبضاتٌ سعةُ كلٍّ منها $0.15\ m$ على طولِ الخيطِ، وانعكسَت عندَ الحاجزِ، ثم عادَت دونَ أن تفقدَ من سعتِها. ما سعةُ النبضةِ على نقطةٍ من الخيطِ، حيث تتقاطعُ الإزاحتانِ القصويان لنقطتَيْن واقعتين على النبضتين؟ وما نوعُ التداخلِ الحاصلِ؟

3. في السؤالِ 2، ما سعةُ النبضةِ على نقطةٍ من الخيطِ، حيث تتقاطعُ الإزاحتان القصوَيان لنقطتَيْن إذا كانَ طرفُ الحبلِ طليقًا؟ وما نوعُ التداخلِ الحاصلِ؟

4. طولُ خيطٍ مشدودٍ بينَ نقطتَيْن $2.0\ m$. ما الأطوالُ الموجيَّةُ الثلاثةُ التي تُحدثُ موجاتٍ واقفةً على هذا الخيطِ؟ اذكرْ طولاً موجيًّا واحدًا على الأقلِّ لا يحدثُ نمطًا لموجةٍ واقفةٍ، وعلِّلْ إجابتَكَ.

ملخَّصُ الفصل 3

أفكارٌ أساسيَّةٌ

القسم 3-1 الحركةُ التوافقيَّةُ البسيطةُ

- في الحركةِ التوافقيَّةِ البسيطةِ تتناسبُ قوَّةُ الإرجاعِ طرديًّا مع الإزاحةِ.
- يهتزُّ نظامُ الكتلةِ–النابض بحركةٍ توافقيَّةٍ بسيطةٍ، ويعبَّرُ عن قوةِ النابضِ بقانون هوك: $\vec{F}_{\text{مرونية}} = -k\vec{x}$.
- في حالةِ زوايا إزاحةٍ صغيرةٍ ($<15°$) يتأرجحُ البندولُ بحركةٍ توافقيَّةٍ بسيطةٍ.
- في الحركةِ التوافقيَّةِ البسيطةِ يكونُ لقوةُ الإرجاعِ والتعجيلُ قيمة قصوى عندمَا تكونُ الإزاحةُ قصوى ويكون للسرعةُ قيمة قصوى عند موقعِ الاتِّزانِ.

القسم 3-2 قياسُ الحركةِ التوافقيَّةِ البسيطةِ

- يعتمدُ الزمنُ الدوريُّ لنظامِ الكتلةِ–النابض، فقط على الكتلةِ وثابتِ النابضِ. يعتمدُ الزمنُ الدوريُّ للبندولِ البسيطِ، فقط على طولِ الخيطِ وتعجيل السقوطِ الحرِّ.
- الترددُّ هو مقلوبُ الزمنِ الدوريِّ.

القسم 3-3 خصائصُ الموجات

- جسَيماتُ الموجةِ تهتزُّ حولَ موقعِ الاتِّزانِ عندَ انتقالِ الموجةِ.
- في حالةِ الموجةِ المستعرِضةِ، تكونُ الاهتزازاتُ متعامدةً مع اتِّجاهِ حركةِ الموجةِ. وفي حالةِ الموجةِ الطوليَّةِ، تكونُ الاهتزازاتُ متوازيةً مع اتِّجاهِ حركةِ الموجةِ.
- سرعةُ الموجةِ تساوي التردُّدَ مضروبًا في الطولِ الموجيِّ: $v = \lambda f$.

القسم 3-4 التفاعلاتُ الموجيَّةُ

- عندمَا تلتقي موجتان أو أكثرُ، تتحرَّكان عبرَ وسطٍ معيَّنٍ. وتتشكَّلُ الموجةُ المحصِّلةُ من جمعِ الإزاحاتِ المنفردةِ معًا، نقطةً نقطةً.
- تتشكَّلُ الموجاتُ الواقفةُ عندما تتداخلُ موجتان لهما نفسُ الترددُّدِ والسعةِ والطولِ الموجيِّ، وتنتقلان في اتجاهَيْن متعاكسَيْن عبرَ وسطٍ معيَّنٍ.

رموزُ المتغيِّراتِ

الكمِّيَّة	رمزُ الكمِّيَّةِ	الوحدة	رمزُ الوحدة
قوةُ النابضِ	$F_{\text{مرونية}}$	نيوتن	N
ثابتُ النابضِ	k	نيوتن/متر	N/m
الزمنُ الدوريُّ	T	ثانية	s
الترددُّ	f	هيرتز = s^{-1}	Hz
الطولُ الموجيُّ	λ	متر	m

مصطلحاتٌ أساسيَّةٌ

الحركةُ التوافقيَّةُ البسيطةُ Simple harmonic motion (ص 63)

السعة Amplitude (ص 70)

الزمنُ الدوريُّ Period (ص 70)

الترددُّ Frequency (ص 70)

الوسط Medium (ص 76)

الموجةُ الميكانيكيَّةُ Mechanical wave (ص 76)

الموجةُ المستعرضةُ Transverse wave (ص 78)

القمَّة Crest (ص 78)

القعر Trough (ص 78)

الطولُ الموجيُّ Wavelength (ص 78)

الموجةُ الطوليَّةُ Longitudinal wave (ص 79)

مبدأُ تراكبِ الموجات Superposition priniciple (ص 84)

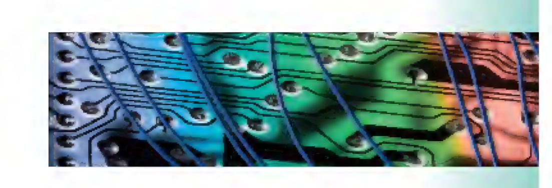
التداخلُ البنَّاء Constructive interference (ص 84)

التداخلُ الإتلافي Destructive interference (ص 85)

الموجةُ الواقفة Standing wave (ص 87)

العقدة Node (ص 87)

البطن Antinode (ص 87)



مراجعةُ الفصل 3

راجعْ وقيِّمْ

الحركةُ التوافقيَّةُ البسيطةُ

أسئلةُ مراجعة

1. ما الميزةُ التي يجبُ أن تتوفَّرَ في حركةِ جسمٍ لتكونَ توافقيَّةً بسيطةً؟
2. هل يُحافظُ تعجيلُ جسمٍ يهتزُّ بحركةٍ توافقيَّةٍ بسيطةٍ على ثباتِه خلالَ الحركةِ؟ هل يمكنُ أن يكونَ صفرًا؟ أوضحْ ذلك.
3. ما نوعُ طاقةِ كرةِ البندولِ قبلَ إفلاتِه؟ كيف تتحوَّلُ هذه الطاقةُ خلالَ دورةٍ تأرجحيَّةٍ واحدةٍ؟

أسئلةُ حولَ المفاهيم

4. يهتزُّ نظامُ الكتلةِ-النابض المثاليُّ إلى ما لا نهايةٍ بحركةٍ توافقيَّةٍ بسيطةٍ. علِّلْ ذلك.
5. في البندولِ البسيطِ يمكنُ تحليل وزنِ الكرةِ إلى مركَّبتَيْن، إحداهُما على خطِّ المماسِ لاتِّجاهِ حركةِ الكرةِ والأُخرى متعامدةٌ مع اتِّجاهِ الحركةِ. أي المركَّبتَيْن هي قوةُ إرجاعٍ؟ علِّل إجابتك.

الزمنُ الدوريُّ والتردُّدُ

أسئلةُ مراجعة

6. ما المسافةُ الكلِّيَّةُ التي يقطعُها جسمٌ يتحرَّكُ ذهابًا وإيابًا بحركةٍ توافقيَّةٍ بسيطةٍ، خلالَ فترةٍ زمنيَّةٍ تساوي الزمنَ الدوريَّ، وعندَما تكونُ السعةُ A؟

أسئلةُ حولَ المفاهيم

7. ماذا يحدثُ للزمنِ الدوريِّ في بندولٍ بسيطٍ، عندَ مضاعفةِ طولِه؟ وعند مضاعفةِ كتلةِ الكرةِ؟
8. لبندولٍ كرةٌ ملأى بالماءِ. ماذا يحدثُ لتردُّدِ اهتزازةِ هذا البندولِ إذا ثُقبَتِ الكرةُ وتسرَّبَ الماءُ ببطءٍ إلى الخارجِ إلى أن تفرغ تمامًا؟
9. تعطي ساعةٌ بندوليَّةٌ التوقيتَ الصحيحَ عند أسفلِ الجبلِ. هل تعطي أيضًا توقيتًا صحيحًا عند قمَّتِه؟ علِّلْ ذلك.
10. إذا كانَت ساعةُ حائط تتأخَّرُ عن التوقيتِ الصحيحِ، فكيف تغيِّرُ طولَ البندولِ بهدفِ تصحيحِ التوقيتِ؟
11. يُستعملُ البندولُ البسيطُ على الطائرةِ أحيانًا كمقياسِ ارتفاعٍ. كيف يتغيَّرُ الزمنُ الدوريُّ لذلك البندولِ عندَ ارتفاعِ الطائرةِ من مستوى الأرضِ إلى ارتفاعِ 1.00×10^4 m؟
12. هل يختلفُ الزمنُ الدوريُّ لنظامِ الكتلةِ-النابض المهتزِّ على سطحِ الأرضِ، عن الزمنِ الدوريِّ لمثيلِه على سطحِ القمرِ؟ علِّل إجابتك.

مسائلُ تطبيقيَّة

13. البندولُ الذي يتأرجحُ مرَّةً كل 1.000 s مرورًا بموقعِ الاتِّزانِ يُسمّى «بندولَ ثوانٍ».
    أ. ما الزمنُ الدوريُّ لأيِّ بندولِ ثوانٍ؟
    ب. يبلغُ طولُ بندولِ الثواني في كامبرج 0.9942 m. ما مقدارُ تعجيل السقوطِ الحرِّ في كامبرج؟
    ج. في طوكيو باليابان، يبلغُ طولُ بندولُ الثواني 0.9927 m. ما مقدارُ تعجيلِ السقوطِ الحرِّ في طوكيو؟

14. عُلِّقَتْ كتلةٌ 1.5 kg بالطرفِ الحرِّ لنابضٍ ثابتُه 1.8×10^2 N/m، ثم أُطلقَ النابضُ بحركةٍ اهتزازيَّةٍ.
أ. ما الزمنُ الدوريُّ لنظامِ الكتلةِ-النابضِ؟
ب. ما تردُّد الاهتزازةِ؟

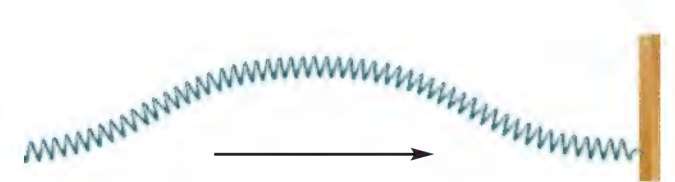
خصائصُ الموجاتِ

أسئلةُ مراجعة

15. ما الميزةُ المشتركةُ لجميعِ الموجاتِ؟

16. بمَ تختلفُ الموجاتُ المستعرِضةُ عن الموجاتِ الطوليَّةِ؟

17. يُظهرُ الشكلُ نبضةً موجيَّةً منتقلةً عبرَ نابضٍ.
أ. في أيِ اتجاهٍ تهتزُّ جسَيماتُ الوسطِ؟ (نسبة إلى أتجاه انتقال الموجة)
ب. هل هي موجةٌ طوليةٌ أم مستعرِضةٌ؟



18. في نابضٍ بحالةِ استطالةٍ، تجدُ بضعَ حلقاتٍ منضغطةٍ وأخرى متباعدةً. ما نوعُ الموجاتِ؟

19. إذا حرّكْتَ طرفَ نابضٍ إلى أعلى وأسفلَ ثلاثَ مرّاتٍ كلَّ ثانيةٍ، فما الزمنُ الدوريُّ لاهتزازةِ الموجاتِ؟ وما تردُّدُها؟

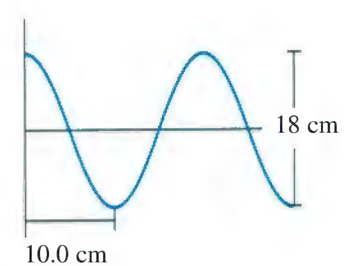
20. كيف تتحرَّكُ نقطةٌ منفردةٌ على خيطٍ عندَ مرورِ موجةٍ مستعرِضة أفقيًا؟

21. ماذا يحدثُ للطولِ الموجيِّ لموجةٍ على خيطٍ، عندَ مضاعفةِ التردُّدِ؟ وماذا يحدثُ لسرعتِها؟

22. لمَ تحتاجُ الموجاتُ الصوتيَّةُ إلى وسطٍ تنتقلُ خلالَه؟

23. طُرِقَتْ شوكتانِ رنّانتانِ بتردُّدَيْن 256 Hz و 512 Hz. أي التردُّدَيْن أسرعُ عبرَ الهواءِ؟

24. ما إحدى إيجابيّاتِ انتقالِ الطاقةِ بوساطةِ الموجاتِ الكهرومغناطيسيَّةِ؟



25. تنتشرُ موجةٌ في اتِّجاه x الموجب بتردُّدِ 25.0 Hz كما يظهرُ في الشكلِ أعلاه. جِدْ لتلك الموجةِ:
أ. السعةَ.
ب. الطولَ الموجيَّ.
ج. الزمنَ الدوريَّ.
د. السرعةَ.

مسائلُ تطبيقيَّة

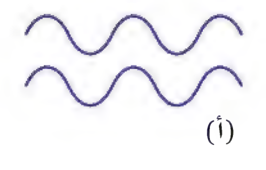


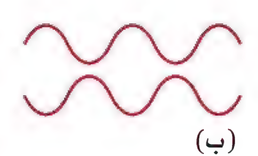
26. تنتشرُ الموجاتُ الدقيقةُ بسرعةِ الضوءِ، 3.00×10^8 m/s. ما طولُها الموجيُّ إذا كانَ تردُّدُها 9.00×10^9 Hz؟

التفاعلاتُ الموجيَّةُ

أسئلةُ مراجعة

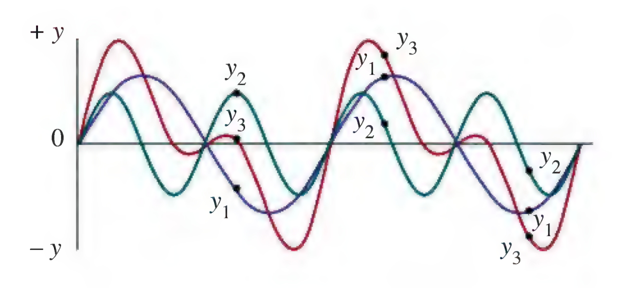
27. استعملْ مبدأَ التراكبِ لرسمِ الموجاتِ المحصِّلةِ لكلٍّ من المثالَيْنِ الظاهرَيْنِ في الشكلِ.


(أ)


(ب)

28. ما الفرقُ بينَ التداخلِ البنّاءِ والتداخلِ الإتلافيِ؟

29. أيُّ الأشكالِ الموجيَّةِ الظاهرةِ في الشكلِ هو الموجةُ المحصِّلةُ؟



30. يرسلُ رونج سلسلةً من النبضاتِ ذاتِ السعةِ 24 cm، عبرَ خيطٍ طرفُه موصولٌ بحاجزٍ ثابتٍ. افترضْ أن النبضاتِ تنعكسُ دون أن تفقدَ من سعتِها. ما السعةُ على نقطةٍ في الخيطِ تتقاطعُ فيها نبضتان، ويكونُ فيها:

أ. الخيطُ مشدودًا وموصولاً بحاجزٍ؟

ب. طرفُ الخيطِ، حيثُ يحدثُ الانعكاسُ، حرَّ الحركةِ إلى أعلى وأسفلَ؟

أسئلةٌ حولَ المفاهيم

31. هل يمكنُ أن تتداخلَ أكثرُ من موجتَيْن في وسطٍ معيَّنٍ؟

32. ما الإزاحةُ المحصِّلةُ في موقعٍ كانَ التداخلُ عليه إتلافيًّا بالكاملِ؟

33. عندَ تداخلِ موجتَيْن هل يمكنُ للإزاحةِ المحصِّلةِ أن تكونَ أكبرَ من إزاحةِ أيٍّ من الموجتَيْن الأصليَّتَيْن؟ في حالِ الإيجابِ، ما الشروطُ اللازمةُ لذلك؟

34. أيُّ الأطوالِ الموجيَّةِ التاليةِ يُحدثُ موجةً واقفةً على خيطٍ طولُه 3.5 m؟

أ. 1.75 m	ج. 5.0 m
ب. 3.5 m	د. 7.0 m

مراجعة عامة

35. يُغطِّسُ لاوند إصبعَه في وعاءِ ماءٍ مرَّتَيْن في الثانيةِ، محدثًا موجاتٍ ذاتَ قممٍ تتباعدُ مسافةَ 0.15 m. جِدِ التردُّدَ والزمنَ الدوريَّ والسرعةَ لتلك الموجاتِ.

36. يتراوحُ تردُّدُ النغماتِ الصادرةِ عن وترٍ مهتزٍّ بينَ 196 Hz و 2367 Hz تقريبًا. جِدِ المدى المحتملَ للأطوالِ الموجيَّةِ التي يحدثُها الوترُ في الهواءِ عندَما تكونُ سرعةُ الصوتِ في الهواءِ 340 m/s.

37. بندولٌ بسيطٌ طولُه 0.850 m. ما تعجيلُ السقوطِ الحرِّ في موقعٍ يبلغُ فيه الزمنُ الدوريُّ للبندولِ 1.86 s؟

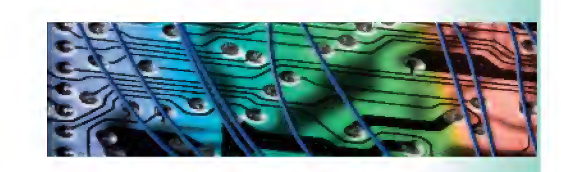
38. ساعةٌ بندوليَّةٌ تعملُ بتوقيتٍ سليمٍ على الأرضِ، أُرسلَتْ إلى القمرِ حيثُ $g_m = 1.63\ m/s^2$. إذا بدأ التوقيتُ الساعةَ 12:00 A.M. (قبلَ الظهرِ)، فكم يكونُ الزمنُ الذي تشيرُ إليه الساعةُ بعدَ 24.0 h؟

التقاريرُ والمشاريع

1. صمِّمْ تجربةً تقارنُ فيها بينَ ثابتِ النابض والزمنِ الدوريِّ لاهتزازةِ نظامٍ يتألَّفُ من نابضين (أو أكثرَ) تمَّ وصلُهما بطريقتَيْن هُما: التتابعُ (وصلُ طرفٍ بطرفٍ)، والتوازي (وصلُ طرفِ كلِّ نابض بنقطةٍ مشتركةٍ). حاولِ الحصولَ على المعدّاتِ اللازمةِ، وقمْ بإجراءِ التجربةِ بعدَ موافقةِ المعلِّمِ.

2. تُعدُّ قاعدةُ تحديدِ الزمنِ الدوريِّ للبندولِ بدلالةِ طولهِ مثالاً جيِّدًا على سعةٍ دون 15^o. صمِّمْ تجربةً تتحقَّقُ فيها من تأثيرِ السعةِ فوقَ 15^o للاهتزازةِ على حركةِ البندولِ. جهِّزْ لائحةً بالمعدّاتِ اللازمةِ، والقياساتِ التي ترغبُ في إجرائِها، والبياناتِ التي ترغبُ في تسجيلِها وما تتوقَّعُه من حساباتٍ. أحضرِ المعدّاتِ وباشرْ بإجراءِ التجربةِ بعدَ موافقةِ المعلِّمِ.

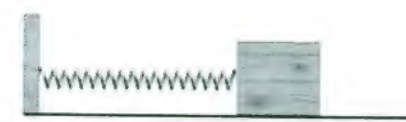
3. قمْ ببحثٍ حولَ الزلازلِ، وأنواعِ الموجاتِ الزلزاليَّةِ المختلفةِ. حضِّرْ لتقديمِ معلوماتٍ حولَ الزلازلِ، تتضمَّنُ إجاباتٍ عن الأسئلةِ التاليةِ: هل تعبرُ الزلازلَ المحيطاتِ؟ ما الذي ينتقلُ من مكانٍ إلى مكانٍ عندَما تعبرُ الموجاتُ الزلزاليَّةُ؟ ما الذي يحدّدُ سرعتَها؟



تقويم الفصل 3

اختيارٌ من متعدِّد

استندْ في إجابتِك عن الأسئلةِ 1-5 إلى المعلوماتِ التاليةِ:



كتلةٌ موصولةٌ بنابضٍ تهتزُّ بحركةٍ توافقيَّةٍ بسيطةٍ على سطحٍ أفقيٍّ لا احتكاكيٍّ.

1. في أيِّ اتجاهٍ تؤثِّرُ قوةُ الإرجاعِ؟
أ. اليسار.
ب. اليمين.
ج. اليسار أو اليمين، بحسبِ حالةِ النابضِ إذا كانَتِ استطالةً أو انضغاطًا.
د. المتعامدُ مع اتِّجاهِ حركةِ الكتلةِ.

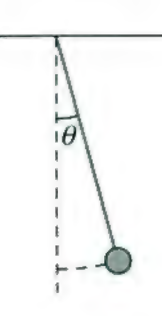
2. ما شكلُ طاقةِ النظامِ عندَ مرورِ الكتلةِ بموقعِ الاتِّزانِ؟
أ. طاقةٌ كامنة مرونيَّةٌ.
ب. طاقةٌ كامنة جذبيَّةٌ.
ج. طاقةٌ حركيةٌ.
د. طاقةٌ حركيةٌ وطاقةٌ كامنةٌ مرونيَّةٌ.

3. ما شكلُ طاقةِ النظامِ عندَما تكونُ الكتلةُ في أقصى إزاحةٍ لها؟
أ. طاقةٌ كامنةٌ مرونيَّةٌ.
ب. طاقةٌ كامنةٌ جذبيَّةٌ.
ج. طاقةٌ حركيةٌ.
د. طاقةٌ حركيةٌ وطاقةٌ كامنةٌ مرونيَّةٌ.

4. أيُّ من التالي لا يؤثِّرُ في الزمنِ الدوريِّ لنظامِ الكتلةِ-النابضِ؟
أ. الكتلة.
ب. ثابتُ النابضِ.
ج. سعةُ الاهتزازةِ.
د. الكتلةُ وثابتُ النابضِ.

5. ما الزمنُ الدوريُّ للاهتزازةِ إذا كانَتِ الكتلةُ 48 kg وثابتُ النابضِ 12 N/m؟
أ. 8π s
ب. 4π s
ج. π s
د. $\frac{\pi}{2}$ s

استندْ في إجابتِك عن الأسئلةِ 6-9 إلى المعلوماتِ التاليةِ:



تتعلَّقُ كرةُ البندولِ بخيطٍ، وتتأرجحُ بحركةٍ توافقيَّةٍ بسيطةٍ.

6. ما قوةُ الإرجاعِ في البندولِ؟
أ. وزنُ الكرةِ الكلِّيُّ.
ب. مركَّبةُ وزنِ الكرةِ المماسيَّةُ لاتِّجاهِ حركتِها.
ج. مركَّبةُ وزنِ الكرةِ المتعامدةُ مع اتِّجاهِ حركتِها.
د. القوةُ المرونيَّةُ للخيطِ الذي استطالَ.

7. أيُّ من التالي لا يؤثِّرُ في الزمنِ الدوريِّ للبندولِ؟
أ. طولُ الخيطِ.
ب. كتلةُ الكرةِ.
ج. تعجيلُ السقوطِ الحرِّ في موقعِ البندولِ.
د. طولُ الخيطِ وكتلةُ الكرةِ.

8. ما تردُّدُ بندولٍ أكملَ 12 دورةً تمامًا خلالَ 2.0 min؟
أ. 0.10 Hz
ب. 0.17 Hz
ج. 6.0 Hz
د. 10 Hz

9. ما عددُ الاهتزازاتِ الكاملةِ لبندولٍ خلالَ 5.00 min إذا كانَ طولُه 2.00 m وتعجيلُ السقوطِ الحرِّ $a_g = 9.80\ m/s^2$؟

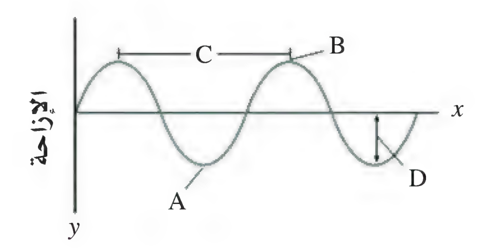
أ. 1.76

ب. 21.6

ج. 106

د. 236

استندْ في إجابتِك عن الأسئلةِ 10-12 إلى الرسمِ البيانيِّ التالي:



10. ما نوعُ الموجةِ التي يمثّلُها الرسمُ البيانيُّ؟

أ. موجةٌ مستعرضةٌ.

ب. موجةٌ طوليَّةٌ.

ج. موجةٌ كهرومغناطيسيَّةٌ.

د. موجةٌ طوليَّةٌ وموجةٌ مستعرضةٌ.

11. أيُّ حرفٍ يرمزُ إلى الطولِ الموجيِّ؟

أ. A   ج. C

ب. B   د. D

12. أيُّ حرفٍ يرمزُ إلى القعرِ؟

أ. A   ج. C

ب. B   د. D

استندْ في إجابتِك عن السؤالَيْن 13 و 14 إلى النصِّ التالي:

تتداخلُ موجتان لهما الطول الموجي نفسه، سعة الأولى 0.75 m وسعة الثانية 0.53 m.

13. ما سعةُ الموجةِ المحصِّلةُ إذا كانَ التداخلُ بنّاءً؟

أ. 0.22 m

ب. 0.53 m

ج. 0.75 m

د. 1.28 m

14. ما سعةُ الموجةِ المحصِّلةُ إذا كانَ التداخلُ إتلافيًّا؟

أ. 0.22 m

ب. 0.53 m

ج. 0.75 m

د. 1.28 m

15. تمرُّ ثماني قممٍ عبرَ نقطةٍ معيَّنةٍ كل 12.0 s، ما سرعةُ الموجةِ إذا كانَتِ المسافةُ بين قمَّتَيْن متتاليتَيْن 1.20 m؟

أ. 0.667 m/s   ج. 1.80 m/s

ب. 0.800 m/s   د. 9.60 m/s

أسئلةٌ ذاتُ إجابةٍ قصيرةٍ

16. الطولُ الموجيُّ للضوءِ الأخضر 5.20×10^{-7} m وسرعتُه في الهواءِ 3.00×10^{8} m/s. احسبْ تردُّدَ الضوءِ الأخضرِ وزمنَه الدوريَّ.

17. ما نوعُ الموجاتِ الذي لا يحتاجُ إلى وسطٍ يعبرُه لكي ينتقلَ؟

أسئلةٌ ذاتُ إجابةٍ مطوَّلةٍ

18. يودُّ زائرٌ للمنارةِ الأثرية في مدينة أربيل معرفةَ ارتفاعِها، فيربطُ حجرًا صغيرًا بطرفِ خيطٍ، صانعًا بذلك بندولاً بسيطًا، ويعلِّقُه فيتدلّى نزولاً، يحيطُهُ درجُ المنارةِ اللولبيُّ. إذا كانَ الزمنُ الدوريُّ للاهتزازةِ 12.1 s، فما ارتفاعُ المنارةِ؟

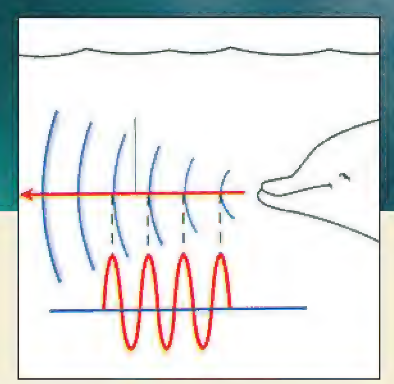
19. تنتقلُ موجةٌ توافقيَّةٌ عبرَ حبلٍ، المصدرُ المهتزُّ يصدرُ 40.0 اهتزازةً خلالَ 30.0 s، قمّةٌ معيّنةٌ في الموجةِ تنتقلُ 425 cm عبرَ الحبلِ خلالَ 10.0 s، ما الطولُ الموجيُّ؟ اشرحْ عملَك.



الفصـــــل 4

الصـوت
Sound





بعضُ الثدييَّاتِ البحريَّةِ، كالدُّلفينِ مثلاً، تستعملُ الموجاتِ الصوتيَّةَ لتحدِّدَ موقعَ الأجسامِ البعيدةِ عنها، بطريقةِ تحديدِ *الموقعِ بالصدى*. يُصدرُ الدلفينُ مجموعة من النبضاتِ الصوتيَّةِ القصيرةِ التي تنتقلُ عبرَ الماءِ، ثم ترتدُّ بعدَ اصطدامِها بأجسامٍ بعيدةٍ، فتنعكسُ عائدةً إلى الدُّلفينِ. من خلالِ تلك الأصداءِ يحدّدُ الدلفينُ حجمَ الطريدةِ وشكلَها وسرعتَها، وبُعدَها أيضًا.

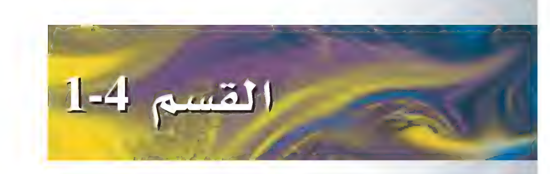
ما يُتوقَّعُ تحقيقُهُ

تدرسُ في هذا الفصلِ جوانبَ الصوتِ الفيزيائيَّةَ، متضمِّنةً طبيعةَ الموجاتِ الصوتيَّةِ والتردُّدَ والشدَّةَ والرنينَ والنغماتِ التوافقيَّةَ.

ما أهمّيتُهُ

بعضُ الحيواناتِ، منها الدُّلفينُ والخفّاشُ، تستعملُ الموجاتِ الصوتيَّةَ لتستكشفَ موقعَ طريدتِها. الآلاتُ الموسيقيَّةُ تولّدُ تنوُّعًا من الأصواتِ المحبَّبةِ في نغماتٍ توافقيَّةٍ مختلفةٍ.

محتوى الفصل 4



الموجاتُ الصوتيَّةُ
Sound Waves

1-4 أهداف القسم

- يفسِّرُ كيفَ تنشأُ الموجاتُ الصوتيَّةُ.
- يربطُ الترَدُّدَ بدرجةِ الصوتِ.
- يقارنُ سرعةَ الصوتِ في أوساطٍ متعدِّدة.
- يربطُ الموجاتِ المستويةَ بالموجاتِ الكرويَّةِ.
- يتعرَّفُ تأثيرَ «دوبلر» ويحدِّدُ التغييرَ في الترَدُّدِ نتيجةَ الحركةِ النسبيَّةِ بينَ المصدرِ والمراقبِ.

الانضغاط

منطقةٌ في الموجةِ الطوليَّةِ حيث يبلغُ الضغطُ أقصاه.

التخلخل

منطقةٌ في الموجةِ الطوليَّةِ حيث يبلغُ الضغطُ أدناه.

إنتاجُ الموجاتِ الصوتيَّةِ

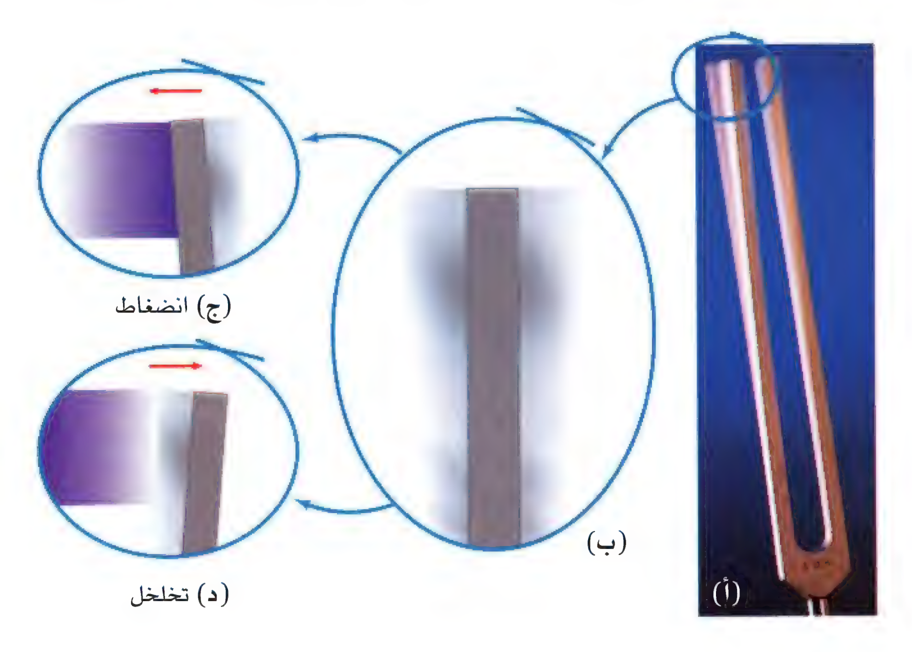
هديرُ محرِّكٍ نفّاثٍ أو زقزقةُ طائرٍ، كلاهما ينتقلُ كموجةٍ صوتيَّةٍ، مصدرُها جسمٌ مهتزٌّ. نتبيَّنُ كيفَ تنتجُ الموجاتُ الصوتيَّةُ مستعينين بالشوكةِ الرنانةِ الظاهرةِ في **الشكل 1-4** (أ).

حين يهتزُّ أحدُ فرعَي الشوكةِ، الظاهرةِ في **الشكل 1-4** (ب)، يجعلُ جزيئاتِ الهواءِ القريبةِ من الفرعِ تتحرَّكُ. فعندَما يتحرَّكُ الفرعُ إلى اليسارِ، كما في **الشكل 1-4** (ج)، تتراصفُ جزيئاتُ الهواءِ القريبةُ العاليةُ منه قسريًّا. تُسمّى هذه المنطقةُ ذاتُ ضغطِ الهواءِ المرتفعِ **انضغاطًا** compression. وعندَما يعودُ فرعُ الشوكةِ إلى اليمينِ، كما في **الشكل 1-4** (د)، تتباعدُ جزيئاتُ الهواءِ ويصبحُ ضغطُه في هذه المنطقةِ أقلَّ من المستوى العادي. تُسمّى هذه المنطقةُ **تخلخلاً** rarefaction.

وعندما تستمرُّ الشوكةُ الرنّانةُ في الاهتزازِ تتألَّفُ سلسلةٌ من الانضغاطاتِ والتخلخلاتِ المتلاحقةِ والمنتشرةِ بعيدًا عن كل فرعٍ من فرعَي الشوكةِ وفي جميعِ الاتجاهاتِ، مثل موجاتِ الماءِ في بركةٍ. وعندما تهتزُّ الشوكةُ بحركةٍ توافقيَّةٍ بسيطةٍ، تهتزُّ جزيئاتُ الهواءِ أيضًا ذهابًا وإيابًا، بحركةٍ توافقيَّةٍ بسيطةٍ.

الموجاتُ الصوتيَّةُ موجاتٌ طوليَّةٌ

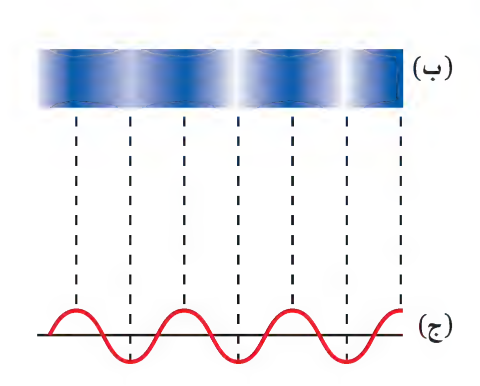
في الموجاتِ الصوتيَّةِ تكونُ اهتزازاتُ جزيئاتِ الهواءِ متوازيةً مع اتِّجاهِ حركةِ الموجةِ. الموجاتُ الصوتيَّةُ إذن موجاتٌ طوليَّةٌ، ويمكنُ تمثيلُ أبسطِ الموجاتِ الصادرةِ عن جسمٍ مهتزٍّ بشكلِ منحنى جيبيٍّ. في **الشكل 2-4** تتوافقُ القممُ مع مراكزِ الانضغاطاتِ (مناطق



الشكل 1-4

(أ) يصدرُ الصوتُ من الشوكةِ الرنانة.
(ب) اهتزازاتُ كلِّ فرعٍ من فرعَيِ الشوكةِ الرنّانة.
(ج) عندَما يهتزُّ الفرعُ إلى اليسارِ تتشكَّلُ منطقةُ ضغطٍ عالٍ.
(د) عندَما يهتزُّ الفرعُ إلى اليمينِ تتشكَّلُ منطقةُ ضغطٍ منخفضٍ.





الشكل 4-2

(أ) عندَ اهتزازِ الشوكةِ (ب) تنشأُ سلسلةٌ من الانضغاطاتِ والتخلخلاتِ التي تتحرَّكُ بعيدًا عن كلِّ فرعٍ. (ج) قممُ هذا المنحنى الجيبيِّ تقابلُ مراكزَ الانضغاطاتِ، والقعور تقابلُ مراكزَ التخلخلاتِ.

الضغطِ المرتفعِ) والقعور مع مراكزِ التخلخلاتِ (مناطق الضغطِ المنخفض). المنحنى الجيبيُّ يمثِّلُ إذًا التغيُّراتِ في ضغطِ الهواءِ نتيجةَ انتقالِ الموجاتِ الصوتيَّةِ. علمًا أن ما يظهرُه **الشكلُ 4-2** هو حالةٌ مثاليَّةٌ، بسببِ تغاضيه عن فقدِ الطاقةِ الذي قد يسبِّبُ نقصًا في سعةِ الموجةِ.

خصائصُ الموجاتِ الصوتيَّةِ

سبقَ أن عرَّفْنا *التردُّدَ* بأنه عددُ الاهتزازاتِ في وحدةِ الزمنِ. فالموجاتُ الصوتيَّةُ التي تستطيعُ الأذنُ البشريةُ العاديةُ سماعَها، وتُسمّى موجاتٍ *مسموعةً*، يتراوحُ تردُّدُها بين 20 Hz و 20 000 Hz. (قدرةُ الفردِ على السمعِ تعتمدُ على عدّةِ عواملَ، منها عمرُه، وتعرُّضُه لأصواتِ الضجيجِ المرتفعةِ.) وتُسمّى الموجاتُ الصوتيَّةُ ذاتُ التردُّدِ الأقلِّ من 20 Hz، والتي لا تستطيعُ الأذنُ العاديَّةُ سماعَها، بالموجاتِ *تحتَ السمعيَّةِ*. أما الموجاتُ الصوتيَّةُ ذاتُ التردُّدِ الأكثرِ من 20 000 Hz والتي لا تستطيعُ الأذنُ العاديَّةُ سماعَها أيضًا فتُسمّى بالموجاتِ *فوقَ السمعيَّةِ*.

بالرغمِ من أن الموجاتِ تحتَ السمعيَّةِ والموجاتِ فوقَ السمعيةِ غيرُ مسموعتَيْن، إلا أنهما تتألَّفانِ من نوعِ الاهتزازاتِ نفسِه الذي تتكوَّنُ منه الأصواتُ التي نسمعُها. أما مدى الموجاتِ الصوتيَّةِ المسموعةِ، فيعتمدُ على مدى تأثُّرِ الأذنِ البشريَّةِ باهتزازاتِها. فالكلابُ والخفافيشُ مثلاً تستطيعان سماعَ الموجاتِ فوقَ السمعيَّةِ، التي تعجزُ عن سماعِها الأذنُ البشريَّةُ.

هل تعلم؟

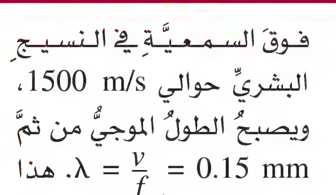
تستعملُ الفيلَةُ الموجاتِ الصوتيَّةَ تحتَ السمعيَّةِ في تواصلِها، حتى وإن كانَت متباعدةً بضعةَ كيلومتراتٍ. تتيحُ لها آذانُها الكبيرةُ التقاطَ التردُّداتِ المنخفضةِ، ذات الأطوالِ الموجيَّةِ الطويلةِ نسبيًّا.

التردُّدُ يحدِّدُ درجةَ الصوتِ

تردُّدُ الموجةِ الصوتيَّةِ المسموعةِ يحدِّدُ ارتفاعَ أو انخفاضَ الصوتِ الذي نسمعُه، ويسمّى **درجةَ الصوتِ** pitch. للأصواتِ الحادَّةِ درجةٌ عاليةٌ، وللأصواتِ الغليظةِ درجةٌ منخفضةٌ. تزدادُ درجةُ الصوتِ بازديادِ تردُّدِه. ودرجةُ الصوتِ لا تعتمدُ على التردُّدِ فحسبُ، بل على عواملَ أخرى أيضًا، كالضجَّةِ الخارجيَّةِ وارتفاعِ الصوتِ.

درجةُ الصوتِ

مقياسُ مدى حدَّةِ الصوتِ المسموعِ أو غلظتِه، تبعًا لتردُّدِ الموجةِ الصوتيَّةِ.



نافذةٌ على الموضوع

التصويرُ بالموجاتِ فوقَ السمعيَّةِ

تُستعملُ الموجاتُ فوقَ السمعيَّةِ للحصولِ على صورِ أشياءَ داخلَ الجسمِ. يحدثُ ذلك بفضلِ خاصّيَّةِ الانعكاسِ الجزئيِّ (partially reflected) للموجاتِ الصوتيَّةِ حين تبلغُ السطحَ الفاصلَ بين مادتَيْن مختلفتَي الكثافة. وتكونُ الصورُ الناتجةُ عن الموجاتِ فوقَ السمعيَّةِ أوضحَ وأكثرَ تفصيلاً من تلك الصورِ التي تنتجُ عن الموجاتِ الصوتيَّةِ ذاتِ التردُّدِ المنخفض، لأن الأطوالَ الموجيَّةَ القصيرةَ للموجاتِ الصوتيَّةِ فوقَ السمعيَّةِ تسمحُ لها بالانعكاسِ بسهولة. لكنَّ الموجاتِ الصوتيَّةَ المسموعةَ وتحتَ السمعيَّةِ ليستا فعّالتَيْن كفايةً، لأن أطوالَهما الموجيَّةَ الطويلةَ تمرُّ حولَ الأجسامِ الصغيرةِ.

لكي يتسنّى للموجاتِ فوقَ السمعيَّةِ «رؤيةُ» شيءٍ داخلَ الجسمِ، يجبُ استعمالُ موجاتٍ ذاتِ طولٍ موجيٍّ يقاربُ قياسَ الشيءِ أو يقلُّ عنه قليلاً. إن التردُّدَ الأفضلَ المستعملَ في جهازٍ فوقَ سمعيٍّ هو حوالي 10 MHz. تكونُ سرعةُ الموجةِ فوقَ السمعيَّةِ في النسيجِ البشريِّ حوالي 1500 m/s، ويصبحُ الطولُ الموجيُّ من ثمَّ $\lambda = \frac{v}{f} = 0.15\ mm$. هذا يعني أن الجهازَ فوقَ السمعيِّ لا يتأثَّرُ بأشياءَ يقلُّ قياسُها عن تلك القيمة.

يستعملُ الأطباءُ عادةً الموجاتِ فوقَ السمعيَّةِ لرؤيةِ الأجنَّة. في هذه العمليةِ يُرسلُ الجهازُ موجاتٍ صوتيَّةً ويلتقطُها بعدَ انعكاسِها عن الجنين. وتتحوَّلُ هذه الموجاتُ الصوتيَّةُ المنعكسةُ إلى إشارةٍ كهربائيَّةٍ تشكِّلُ صورةً على شاشةٍ فَلْوَريَّة. عندَ تكرارِ هذه العمليَّةِ لأجزاءٍ مختلفةٍ من بطنِ الأمِّ، يتمكّنُ الأخصائيُّ من الحصولِ على صورةٍ كاملةٍ للجنين، كالصورةِ الظاهرةِ أعلاه. تسمحُ تلك الصورُ للأطباءِ بالكشفِ عن بعضِ أنواعِ التشوُّهاتِ الجنينيَّة.

اعتمادُ سرعةِ الصوتِ على الوسطِ

تنتشرُ الموجاتُ الصوتيَّةُ عبرَ الأجسامِ الصلبةِ والسائلةِ والغازيَّة. وبما أن الموجاتِ تتألَّفُ من اهتزازاتِ الجسيم، فإن سرعةَ الموجةِ تعتمدُ على مقدارِ السرعةِ التي ينقلُ فيها الجسَيمُ حركتَه إلى جسَيمٍ آخرَ. فجسيماتُ المادةِ الصلبة، مثلاً، تستجيبُ للاضطرابِ بسرعةٍ أكبرَ من جسيماتِ المادَّةِ الغازيَّة، لأن جسَيماتِ الجسمِ الصلبِ أكثرُ تقاربًا من جسَيماتِ الجسمِ الغازيِّ. في النتيجةِ وبشكلٍ عامٍّ، تعبرُ الموجاتُ الصوتيَّةُ الأجسامَ الصلبةَ أسرعَ من عبورِها للأجسامِ الغازيَّة. يُظهرُ **الجدولُ 1-4** سرعةَ الموجاتِ الصوتيَّةِ في أوساطٍ مختلفةٍ.

تعتمدُ سرعةُ الصوتِ أيضًا على درجةِ حرارةِ الوسطِ. عندَ ارتفاعِ درجةِ الحرارةِ يتزايدُ تصادمُ جسَيماتِ الغازِ، مما يجعلُ انتشارَ الاضطرابِ الموجيِّ أسرعَ عند درجةِ حرارةٍ مرتفعةٍ مقارنةً بدرجاتِ الحرارةِ المنخفضة. في حالةِ الأجسامِ السائلةِ والصلبةِ تكونُ الجسَيماتُ متقاربةً بشكلٍ يصعبُ فيه ملاحظةُ الفرقِ الناجمِ عن التغيُّراتِ في درجةِ الحرارةِ.

الجدول 1-4 سرعةُ الصوتِ في أوساطٍ مختلفةٍ

الوسط	v (m/s)
الغازات	
هواء (0°C)	331
هواء (25°C)	346
هواء (100°C)	366
هيليوم (0°C)	972
هيدروجين (0°C)	1290
أكسجين (0°C)	317
السوائلُ عند 25°C	
كحولُ الميثل	1140
ماءُ البحر	1530
ماء	1490
الأجسامُ الصلبةُ	
ألمنيوم	5100
نحاس	3560
حديد	5130
رصاص	1320
مطّاطٌ صلدٌ	54

انتقالُ الموجاتِ الصوتيَّةِ في ثلاثةِ أبعادٍ

ظهرَتِ الموجاتُ في هذا الفصل، وهي تنتشرُ في بعدٍ واحدٍ. في الحقيقةِ تنتشرُ الموجاتُ الصوتيَّةُ بعيدًا عن مصدرِها في ثلاثةِ أبعاد. عندَما يصدرُ صوتٌ وسطَ غرفةٍ، يمكنُ سماعُ الصوتِ الصادرِ منه في جميعِ أرجاءِ الغرفةِ، لأن الموجاتِ الصوتيَّةَ تنتشرُ في جميعِ الاتِّجاهاتِ. تكونُ جبهاتُ الموجاتِ الصوتيَّةِ، المنتشرةِ في جميعِ الاتِّجاهاتِ، كرويَّةً

تقريبًا. لتبسيطِ الدراسةِ نفترضُ أن جبهاتِ الموجاتِ كرويَّةٌ تمامًا، ما لم يُذكرْ غيرُ ذلك.

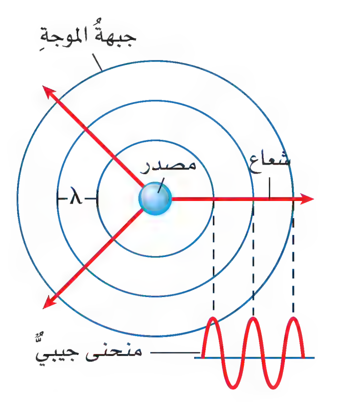
تمثّلُ الموجاتُ الكرويَّةُ بيانيًّا في بعدَين، بشكلِ سلسلةِ دوائرَ تحيطُ بالمصدرِ، كما يظهرُ في **الشكل 4-3**، حيثُ تمثّلُ الدوائرُ مراكزَ الانضغاطات، وتُسمّى *جبهاتِ الموجات*. وما دمْنا ندرسُ في بعدَيْن ظاهرةً ذاتَ ثلاثةِ أبعادٍ، فإن كلَّ دائرةٍ تمثّلُ مساحةً كرويَّةً.

بما أن موقعَ مركزِ الانضغاطِ تحدِّدُه جبهةُ الموجةِ، فإن المسافةَ الفاصلةَ بينَ جبهتَيْن موجيَّتَيْن متتابعتَيْن تكونُ مساويةً للطولِ الموجيِّ. الخطوطُ الشعاعيَّةُ المتعامدةُ مع جبهاتِ الموجاتِ تُسمّى *أشعَّةً*، وتدلُّ على اتِّجاهِ حركةِ الموجةِ. أما المنحنى الجيبيُّ الظاهرُ في **الشكل 4-3** فإنه يقابلُ شعاعًا واحدًا. ولأن القممَ في المنحنى الجيبيِّ تمثّلُ الانضغاطاتِ فإن كلَّ جبهةِ موجةٍ متقاطعةٍ مع هذا الشعاعِ تكونُ مقابلةً للقمَّةِ على المنحنى الجيبيِّ.

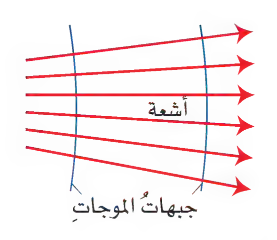
لنأخذْ جزءًا صغيرًا من جبهةِ موجةٍ كرويَّةٍ تبعدُ عدةَ أطوالٍ موجيَّةٍ عن مصدرِها، كما يظهرُ في **الشكل 4-4**. في هذه الحالةِ تكونُ الأشعَّةُ شبهَ متوازيةٍ أيضًا. وبالتالي فإن جبهاتِ الموجاتِ، البعيدةَ عن المصدرِ مسافةً كبيرةً مقارنةً بالطولِ الموجيِّ، نستطيعُ أن نفترضَها مستوياتٍ متوازيةً. تُسمّى تلك الموجاتُ *موجاتٍ مستويةً*. كما أن أيَّ جزءٍ صغيرٍ من الموجةِ الكرويَّةِ، بعيدٍ عن المصدرِ، يمكنُ اعتبارهُ موجةً مستويةً. أخيرًا يمكنُ التعاملُ مع الموجاتِ المستويةِ جميعِها كموجاتٍ ذاتِ بعدٍ واحدٍ، تنتشرُ في الاتِّجاهِ نفسِه، كما في فصلِ «الاهتزازاتُ والموجاتُ».

اختراق جدار الصوت

حين تحلّقُ طائرة بسرعة أقلّ من سرعةِ الصوتِ تحدثُ أثناء طيرانها اضطرابات في ضغط الهواء. وهذه الاضطرابات تتحرَّك أمامَ الطائرةِ بسرعةِ الصوتِ وتتشتَّت بينما تلحقُ الطائرة بهذه الاضطرابات بسرعة أقلّ كما في **الشكل 4-5** (أ). وحين تصلُ سرعة الطائرةِ إلى سرعةِ الصوتِ تتراكمُ تلك الإضطرابات في مقدمةِ الطائرة فتؤدّي إلى حدوثِ موجة صدمية كما في **الشكل 4-5** (ب). لكن حين تتجاوزُ سرعة الطائرةِ سرعة الصوتِ فإن الموجة الصدمية تتشكَّل عند جوانبها كما في **الشكل 4-5** (ج)، وتتراكبُ قممها ليتنتج عنها دويّ هائل (موجة الرجَّة) يصل إلى الأرض. ينتجُ عن اختراقِ الطائرةِ لجدارِ الصوتِ طاقة كبيرة قد تؤدّي إلى كسرِ نوافذ البيوت في بعض الأحيان.

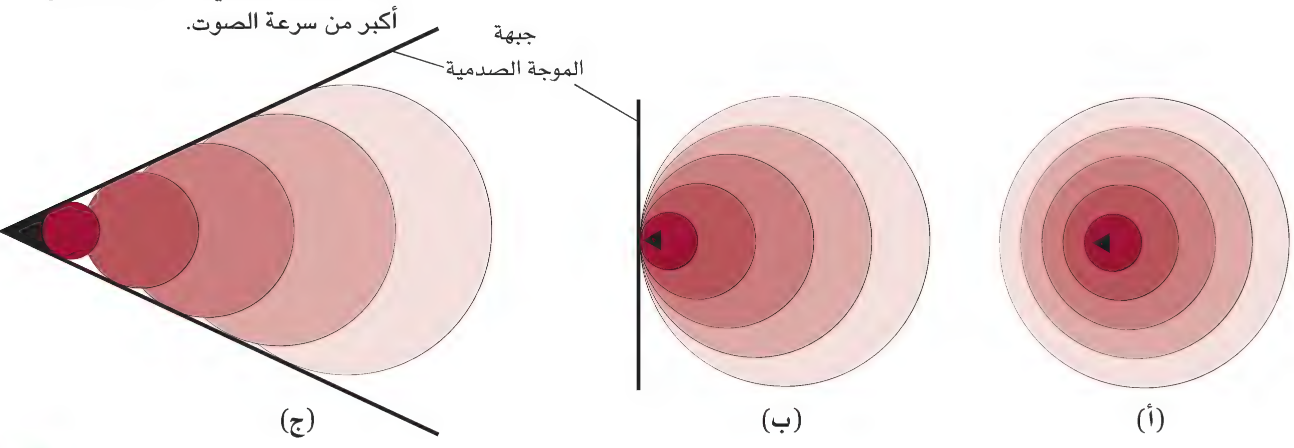


الشكل 4-3
في هذه الموجةِ الكرويَّة، تمثِّلُ الجبهاتُ الموجيَّةُ انضغاطات، وتشيرُ الأشعَّةُ إلى اتِّجاهِ حركةِ الموجة. كلُّ جبهةِ موجة تقابلُ قمَّةً على المنحنى الجيبيِّ. بدورِه يمثِّلُ المنحنى شعاعًا واحدًا.



الشكل 4-4
جبهات الموجاتِ الكرويَّةُ والبعيدةُ جدًّا عن المصدرِ يمكنُ مقاربتُها بمستوياتٍ متوازيةٍ تُسمَّى موجاتٍ مستويةً.

الشكل 4-5
رسمٌ تخطيطيٌّ لانتقال سرعةِ الصوتِ لطائرة تحلِّق بسرعة: (أ) أقلَّ من سرعة الصوت. (ب) تساوي سرعة الصوت. (ج) أكبر من سرعة الصوت.



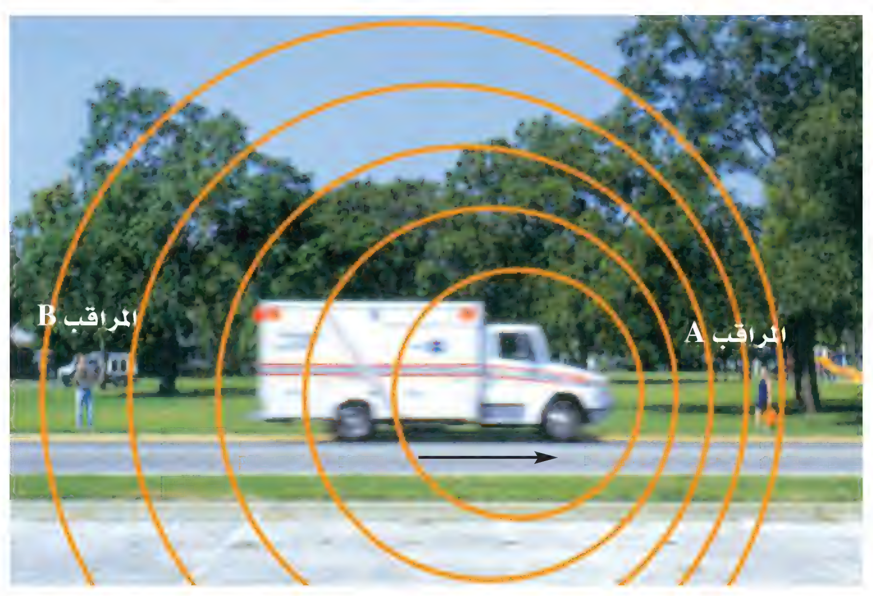
الفيزياءُ والحياة

1. قارئُ مقامات: افترضْ أنك تسمعُ صوتَ قارئِ مقامٍ يصدرُ من جهازِ تسجيلٍ في الطرفِ المواجهِ لك من الغرفةِ. تلتقطُ أذنُكَ الانضغاطاتِ والتخلخلاتِ من الموجةِ الصوتيَّةِ، فتقومُ أنت بترجمةِ تلك الاهتزازاتِ إلى صوتٍ. هل انتقلَتْ جسَيماتُ الهواءِ المهتزَّةُ قربَ أذنِك عبرَ الغرفةِ بوساطةِ تلك الموجةِ الصوتيَّةِ؟ كيف تعرفُ؟

2. البرقُ والرعدُ: الموجاتُ الضوئيَّةُ تنتشرُ أسرعَ بمليونِ مرَّةٍ من الموجاتِ الصوتيَّةِ في الهواءِ. خذْ تلكَ المعلومةَ بالحسبانِ، وأنت توضحُ كيف يتمُّ حسابُ بُعدِ الصاعقةِ من خلالِ قياسِ الزمنِ بالثواني بينَ الوميضِ وصوتِ الرعدِ.

تأثيرُ "دوپلر"

تخيَّلْ نفسَك واقفًا على الرصيفِ لحظةَ مرورِ سيارةِ إسعافٍ بسرعةٍ، مطلقةً صافرتَها. تلاحظُ التغيُّرَ في درجةِ صوتِ الصافرةِ، ذلك أنها تزدادُ عندَ اقترابِها منك، ثم تنخفضُ عندَ ابتعادِها عنك. وكما تعلمُ فإن درجةَ الصوتِ تعتمدُ على تردُّدِه، لكن في هذه الحالةِ لا تغيِّرُ الصافرةُ تردُّدَها، فكيف إذنْ تفسِّرُ التغيُّرَ في درجةِ الصوتِ؟



الشكل 6-4
عندما تتحرَّكُ سيارةُ الإسعافِ إلى اليمينِ يسمعُ المُراقبُ A الصافرةَ بتردُّدٍ أكبرَ من تردُّدِ الصوتِ الذي يسمعُه السائقُ. أما المُراقبُ B، فيسمعُها بتردُّدٍ أقلَّ.

الحركةُ النسبيَّةُ تسبِّبُ تغيُّرًا في التردُّد

عندَما تطلقُ سيارةُ إسعافٍ متوقِّفةٌ صافرتَها، تتوقَّعُ أن يسمعَ مراقبٌ يقفُ في الشارعِ الصوتَ بالتردُّدِ نفسِه الذي يسمعُه سائقُ سيارةِ الإسعافِ. لكن في حالةِ سيارةِ إسعافٍ متحرِّكةٍ، كما يظهرُ في **الشكل 6-4**، تكونُ هناكَ حركةٌ نسبيَّةٌ بين سيارةِ الإسعافِ المتحرِّكةِ والمراقبِ الساكنِ. تؤثِّرُ هذه الحركةُ النسبيَّةُ في الطريقةِ التي يلتقطُ فيها المراقبُ جبهاتِ موجاتِ الصوتِ التي تصدرُ عن الصافرةِ. (لتبسيطِ الأمرِ نفترضُ أن الموجاتِ الصوتيَّةَ التي تصدرُها الصافرةُ كرويَّةٌ.)

بالرغمِ من أن تردُّدَ صوتِ الصافرة يبقى ثابتًا، فإن جبهاتِ الموجاتِ، التي تصلُ إلى مراقبٍ (A) يقفُ أمامَ السيارةِ تكونُ أكثرَ مما لو كانتِ السيارةُ متوقِّفةً. السببُ أن مصدرَ الصوتِ يتحرَّكُ في اتِّجاهِ المراقبِ. بما أن سرعةَ الصوتِ في الهواءِ لا تتغيَّرُ لاعتمادِ سرعةِ الصوتِ على درجةِ حرارةِ الهواءِ، فإن حاصلَ ضربِ الطولِ الموجيِّ في التردُّدِ يبقى ثابتًا. وبما أن الطولَ الموجيَّ أقلُّ، فإن التردُّدَ الذي يسمعُه المراقبُ يكونُ أكبرَ من تردُّدِ المصدرِ.

إذا كانت سرعة السيارة بالنسبة إلى المراقب الساكن (A) هي v_s وسرعة الموجات الصوتية التي تطلقها السيارة في الهواء هي v، فإن الموجة تقطع خلال زمن دوري T، مسافة $d_1 = vT = \lambda$. وخلال الزمن الدوري نفسه، تقطع سيارة الإسعاف مسافة $d_2 = v_sT$، فيكون الطول الموجي الجديد:

$$\lambda' = d_1 - d_2 = T\,(v - v_s) = \frac{v - v_s}{f}$$

أو $$\lambda' = \frac{v}{f'}$$

حيث $$f' = f\,\frac{v}{v - v_s}$$

وبما أن $v < v - v_s$ لذلك تكون $f' > f$. وبناءً على ذلك فإن المراقب (A) يسمع صفير السيارة بتردُّد f' أكبر من تردُّدها الأصلي f.

وللسببِ نفسِه، تكونُ جبهاتُ الموجاتِ التي تصلُ إلى مراقبٍ (B) يقفُ خلفَ السيّارةِ أقلَّ ممّا لو كانَتِ السيّارةُ متوقِّفةً. نتيجةً لذلك يكونُ تردُّدُ الصوتِ الذي يسمعُه المراقبُ أقلَّ من تردُّدِ المصدرِ. السبب في ذلك أن الطول الموجي λ' الذي يرصده المراقب يكون في هذه الحالة:

$$\lambda' = d_1 + d_2 = T\,(v + v_s) = \frac{v + v_s}{f} = \frac{v}{f'}$$

فتكون $$f' = f\,\frac{v}{v + v_s}$$

ولأن $v < v + v_s$، تكون $f' < f$

وفي الحالة العامة نحصل على: $$f' = f\,\frac{v - v_o}{v - v_s}$$

حيث v_o سرعة المراقب A بالنسبة للهواء الساكن.

وبناء على ذلك فإن المراقب (B) يسمع صفير السيارة بتردُّد f' أقل من تردُّدها الأصلي.

تأثيرُ دوبلر

تغيُّرٌ ملحوظٌ في التردُّدِ نتيجةَ للحركةِ النسبيَّةِ بينَ مصدرِ الموجاتِ والمُراقِبِ.

يُسمّى تغيُّرُ التردُّدِ هذا **تأثيرَ دوبلر** Doppler effect نسبةً إلى أوَّلِ من اكتشفَهُ، وهو الفيزيائيُّ النمساويُّ كريستيان دوبلر (1803-1853).

بما أن التردُّدَ يحدِّدُ درجةَ الصوتِ، فإن درجةَ الصوتِ الذي يسمعُه كلُّ مراقبٍ تعتمدُ على تأثيرِ دوبلر. وفي حين أن المراقبَ الواقفَ أمامَ سيّارةِ الإسعافِ يسمعُ درجةَ صوتٍ عاليةً فإن المراقبَ الواقفَ خلفَ السيارةِ يسمعُ درجةَ صوتٍ منخفضةً.

تناولْنا في دراستِنا مصدرَ صوتٍ متحرِّكًا بالنسبةِ إلى مراقبٍ ساكنٍ، لكنَّ تأثيرَ دوبلر يحدثُ أيضًا عندما يكونُ المراقبُ متحرِّكًا بالنسبةِ إلى مصدرٍ ساكنٍ، أو عندما يكونان كلاهما في حالةِ حركةٍ بسرعتَينِ مختلفتَينِ.

باختصارٍ يحدثُ تأثيرُ دوبلر في حالةِ الحركةِ النسبيَّةِ بينَ مصدرِ الموجاتِ والمراقبِ.

وبالرغمِ من شيوعِ الاختباراتِ لتأثيرِ دوبلر مع الموجاتِ الصوتيَّةِ تحديدًا، فإنه يبقى ظاهرةً عامَّةً لكلِّ الموجاتِ، وضمنَها الموجاتُ الكهرومغناطيسيَّةُ، كالضوءِ مثلاً.

مراجعةُ القسم 1-4

1. ما العلاقةُ بينَ الترددِ ودرجةِ الصوتِ؟

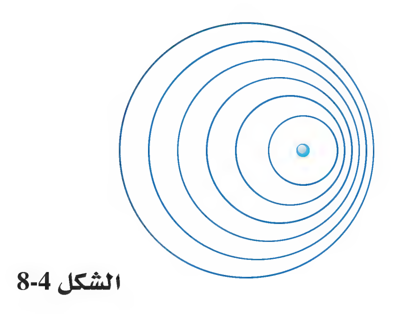
2. تنتشرُ النبضاتُ الصوتيَّةُ المنبعثةُ من الدلفينِ بمعدَّلِ 1450 m/s عبرَ ماءِ المحيطِ عندَ درجةِ حرارةٍ 20ºC، إذا كانَت سرعةُ تلك النبضاتِ في الهواءِ تبلغُ 342.9 m/s، عندَ درجةِ حرارةٍ 20ºC، فكيف تفسِّرُ هذا الفرقَ في السرعةِ؟

3. **تفسيرُ الرسم:** هل يمكنُ اعتبارُ الجزءِ الداخليِّ لجبهةِ الموجةِ الظاهرِ في **الشكل 7-4** موجةً شبهَ مستويةٍ؟ علِّلْ ذلك.



الشكل 7-4

4. **تفسيرُ الرسم:** **الشكل 8-4** رسمٌ لتأثيرِ دوبلر في حوضِ الأمواجِ. في أي اتِّجاهٍ يتحرَّكُ مصدرُ تلك الموجاتِ؟



الشكل 8-4

القسم 2-4

شدَّةُ الصوتِ والرنينِ
Sound Intensity and Resonance

2-4 أهداف القسم

- يحسبُ شدَّةَ الموجاتِ الصوتيَّةِ.
- يربطُ شدَّةَ الصوتِ بمستوى شدَّةِ الصوتِ وارتفاعِ الصوتِ المسموعِ.
- يوضحُ كيف يحدث الرنينُ.

شدَّةُ الصوتِ

وردَ في القسمِ 4-1، أن الموجاتِ الصوتيَّةَ المنتقلةَ في الهواءِ موجاتٌ طوليَّةٌ. وعندَ انتقالِ هذهِ الموجاتِ بعيدًا عن مصدرِها، تنتقلُ الطاقةُ من جزيءٍ هوائيٍّ إلى آخرَ. يُسمّى المعدَّلُ الزمني لانتقالِ تلك الطاقةِ عبرَ وحدةِ مساحةٍ من الموجةِ المستويةِ **شدَّةَ الموجة** wave intensity. بما أن P قد تمَّ تعريفُها كمعدَّلٍ زمني لانتقالِ الطاقةِ، فيمكنُنا كتابةُ الشدَّةِ (I) بدلالةِ القدرةِ كما يلي:

$$I = \frac{P}{\text{المساحة}} = \frac{\Delta E/\Delta t}{\text{المساحة}}$$

شدَّةُ الموجة

المعدَّلُ الزمني لانتقالِ طاقةِ الموجةِ عبرَ وحدةِ مساحةٍ متعامدةٍ مع اتِّجاهِ حركةِ الموجةِ.

بما أن وحدةَ القدرةِ في النظامِ العالميِّ SI هي الواط (W)، فإن وحدةَ الشدَّةِ تكونُ واط لكلِّ مترٍ مربَّعٍ (W/m^2). في حالةِ الموجةِ الكرويَّةِ، تنتقلُ الطاقةُ بشكلٍ متساوٍ في كلِّ الاتِّجاهاتِ، وفي هذه الحالةِ، تتوزَّعُ القدرةُ المنبعثةُ من المصدرِ (P) على سطحٍ كرويٍّ (مساحةُ مقطعِه = $4\pi r^2$)، مفترضين عدمَ حدوثِ أيِّ امتصاصٍ في الوسطِ الذي تنتقلُ فيه الموجةُ.

شدَّةُ الموجةِ الكرويَّةِ

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}$$

$$\text{الشدَّة} = \frac{(\text{القدرة})}{(4\pi)(\text{المسافة من المصدر})^2}$$

تدلُّ هذه المعادلةُ على أن شدَّةَ الموجةِ الصوتيةِ تقلُّ كلما ازدادتِ المسافةُ من المصدرِ. يحدثُ ذلك بسببِ انتشارِ كمّيَّةِ الطاقةِ نفسِها على مساحةٍ أكبرَ.

مثال 4 (أ)

شدَّةُ الموجاتِ الصوتيَّةِ

المسألة

ما شدَّةُ الموجاتِ الصوتيَّةِ الصادرةِ عن مذياعٍ يبعدُ مسافةَ 3.2 m، إذا كانتِ القدرةُ المنتجةُ من المذياعِ تساوي 20.0 W؟ (افترضْ أن الموجاتِ الصوتيَّةَ كرويَّةٌ.)

الحـــلّ

1. أعرف

المعطى: $P = 20.0\ W$ $\quad$ $r = 3.2\ m$

المجهول: $I = ?$

2. أخطط أستعملُ معادلةَ الشدَّةِ في حالةِ الموجةِ الكرويَّةِ.

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}$$

3. أحسب

$$= \frac{20.0 \text{ W}}{4\pi(3.2 \text{ m})^2}$$

$$\boxed{I = 0.16 \text{ W/m}^2}$$

جوابُ الآلةِ الحاسبةِ

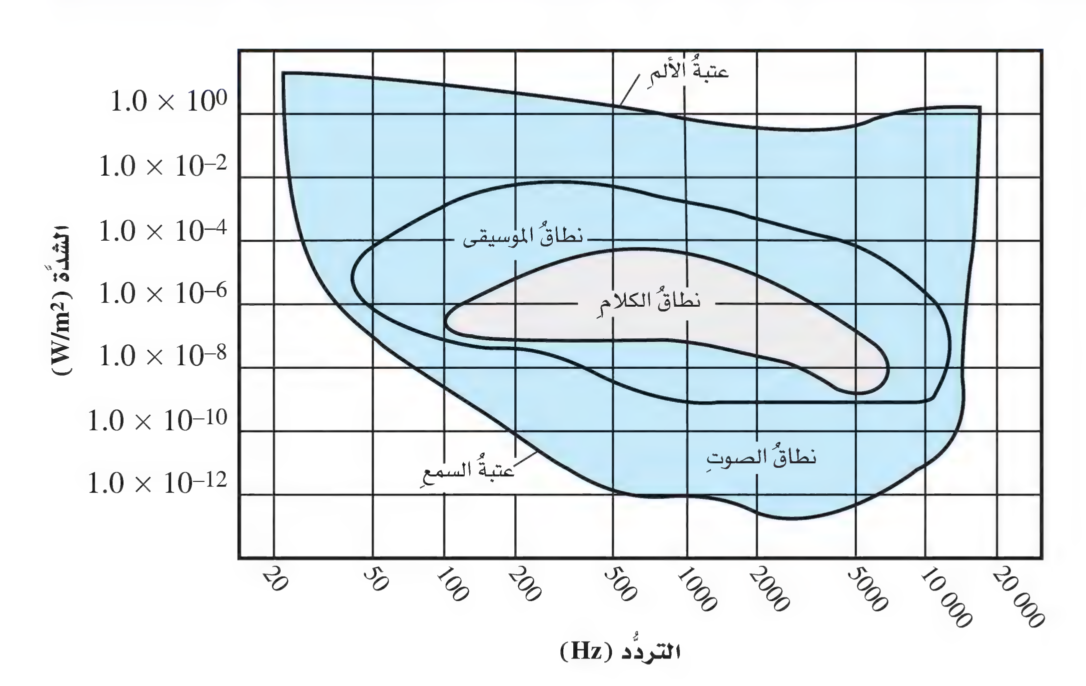
جوابُ الآلةِ الحاسبةِ للمسألةِ 0.00155424799. يقرَّبُ الجوابُ إلى 0.16 ليتوافقَ مع عددِ الأرقامِ المعنويَّةِ في المعطى.

تطبيق 4 (أ)

شدَّةُ الموجاتِ الصوتيَّةِ

1. عندَ الحدِّ الأقصى لارتفاعِ الصوتِ، تصلُ القدرةُ المنتجةُ لـ 75 آلةً وتريةً وهوائيَّةً إلى 70.0 W. ما شدَّةُ الموجاتِ الصوتيَّةِ التي يلتقطُها مستمعٌ يجلسُ على مسافةِ 25.0 m من مصدرِ الصوتِ؟

2. إذا كانَتْ شدَّةُ صوتِ شخصٍ 4.6×10^{-7} W/m² على مسافةِ 2.0 m، فكمِ القدرةُ الصوتيَّةُ الناتجةُ عن الشخصِ؟



الشكل 9-4 يعتمدُ السمعُ البشريُّ على التردُّدِ وشدَّةِ الموجاتِ الصوتيَّةِ معًا. الأصواتُ التي تقعُ في منتصفِ مدى التردُّداتِ يسهلُ سماعُها أكثرَ (على شدَّةٍ منخفضةٍ) من التردُّداتِ المنخفضةِ أو المرتفعةِ.

الشدَّةُ والتردُّدُ يحدِّدانِ الأصواتَ المسموعةَ

درسْنا في القسمِ 1-4 أن تردُّدَ الموجاتِ الصوتيَّةِ التي يسمعُها الإنسانُ العادي تتراوحُ بينَ 20 Hz و 20 000 Hz. والشدَّةُ أيضًا عاملٌ يحدِّدُ أيَّ الأصواتِ مسموعةٌ. يظهرُ **الشكلُ 9-4** كيف يعتمدُ مدى السمعِ في أذنِ الإنسانِ العاديِّ على التردُّدِ والشدَّةِ معًا. ترى في الرسمِ البيانيِّ أن الأصواتَ ذاتَ التردُّداتِ المنخفضةِ (أقلّ من 50 Hz) أو المرتفعةِ

(أكثرَ من 12 000 Hz) يجبُ أن تكونَ نسبيًّا على درجةٍ من الشدَّةِ لتُسمعَ. أما الأصواتُ التي تقعُ في منتصفِ الطيفِ، فتكونُ مسموعةً على درجاتٍ منخفضةٍ من الشدَّةِ. أكثرُ الأصواتِ خفوتًا يمكنُ سماعُها بتردُّدِ 1000 Hz تقريبًا، وبشدَّةِ 1.0×10^{-12} W/m²، تلك الأصواتُ تقعُ ضمنَ *عتبةِ السمعِ*. (لاحظْ أن الأذنَ البشريَّةَ تستطيعُ التقاطَ أصواتٍ أكثرَ خفوتًا على تردُّدٍ يبلغُ حوالي 3300 Hz.) ويُمثِّلُ المنحنى الأدنى في **الشكل 9-4** عتبةَ السمعِ على كل تردُّدٍ.

أكثرُ الأصواتِ ارتفاعًا، وبمقدورِ الأذنِ تحمُّلُها، تبلغُ شدَّتُها حوالي 1.0 W/m²، وتُسمّى *عتبةَ الألمِ*، لأنها إن زادَت عن تلك الشدَّةِ يسبِّبُ سماعُها ألمًا. ويمثِّلُ المنحنى الأعلى في **الشكل 9-4** عتبةَ الألمِ على كلِّ تردُّدٍ.

والتعرُّضُ لأصواتٍ فوقَ حدِّ الألمِ قد يحدثُ ضررًا فوريًّا للأذنِ، حتى وإن لم يكنْ هناك إحساسٌ بالألمِ. كما أن استمرارَ التعرُّضِ للأصواتِ ذاتِ الشدّةِ المنخفضةِ، قد يضرُّ بالأذنِ. لهذا السببِ يستعملُ بعضُ الموسيقيين خلالَ أدائِهم سداداتٍ للأذنِ. تجدرُ الملاحظةُ أن عتبةَ السمعِ وعتبةَ الألمِ تلتقيانِ عند الطرفَينِ الأدنى والأعلى للطيفِ.

قياسُ مستوى شدَّةِ الصوتِ (β)

كما يُحدِّدُ تردُّدُ الموجةِ الصوتيَّةِ درجةَ الصوتِ، تُحدِّدُ الشدَّةُ تقريبًا ارتفاعَ الصوتِ المسموعِ. لكنَّ ارتفاعَ الصوتِ لا يتناسبُ طرديًّا مع الشدَّةِ، لأن الإحساسَ بارتفاعِ الصوتِ شبهُ لوغاريتميٍّ في الأذنِ البشريَّةِ.

مستوى شدَّةِ الصوتِ β هو نسبةُ شدَّةِ موجةٍ صوتيَّةٍ معيَّنةٍ إلى شدَّةِ موجةٍ صوتيَّةٍ عندَ عتبةِ السمعِ، وليسَ له وحدةٌ. إن ارتفاعَ الصوتِ يتناسبُ طرديًّا مع لوغاريتمِ النسبةِ، ويُستعملُ **الديسيبل** decibel (dB) للتعبيرِ عن مستوى شدَّةِ الصوتِ.

الديسيبل

وحدةٌ بلا بُعدٍ تقيسُ مستوى شدَّةِ الصوتِ.

مستوى شدَّةِ الصوتِ

$$\beta = 10 \log \frac{I}{I_o}$$

حيث I = شدَّةُ الصوت

I_o = شدَّةُ عتبةِ السمعِ وتساوي 1.0×10^{-12} W/m²

هل تعلم؟

الوحدةُ الأصليَّةُ لمستوى الديسيبل هي الـ «بِل»، تيمُّنًا بألكسندر بِل، مخترعِ الهاتفِ. الديسيبل يساوي 0.1 بِل.

تكون عتبة السمع صفرًا لأن $I = I_0$ لذلك:

$$\beta = 10 \log \frac{I}{I_o}$$

$$= 10 \log 1 = 0$$

أما عتبة الألم فهي:

$$\beta = 10 \log \frac{1 \times 10^0}{1 \times 10^{-12}}$$

$$= 10 \log 10^{12} = 10 \times 12 = 120 \text{ dB}$$

يوضحُ **الجدولُ 2-4** شدَّةَ الصوتِ ومستوى الشدَّةِ لبعضِ مصادرِ الصوتِ.

الجدول 2-4 شدَّةُ الصوتِ ومستوى الشدَّةِ لبعضِ مصادرِ الصوتِ

مصادرُ الصوتِ	الشدَّة (W/m^2)	مستوى الشدَّةِ بالديسيبل (dB)
عتبةُ السمعِ	1.0×10^{-12}	0
حفيفُ ورقِ الشجرِ	1.0×10^{-11}	10
همسٌ خفيفٌ	1.0×10^{-10}	20
همس	1.0×10^{-9}	30
أزيزُ بعوضةٍ	1.0×10^{-8}	40
محادثةٌ عاديَّةٌ	1.0×10^{-7}	50
مكيِّفٌ يبعدُ 6 m	1.0×10^{-6}	60
مكنسةٌ كهربائيَّةٌ	1.0×10^{-5}	70
ازدحامُ السيرِ أو ساعةُ منبِّهٍ	1.0×10^{-4}	80
قطَّاعةُ خشبٍ	1.0×10^{-3}	90
قطارٌ كهربائيٌّ نفقيٌّ، مولِّدٌ كهربائيٌّ	1.0×10^{-2}	100
منبِّهُ السيارةِ على بعدِ 1 m	1.0×10^{-1}	110
عتبةُ الألمِ	1.0×10^{0}	120
قصفُ الرعدِ، رشَّاشٌ حربيٌّ	1.0×10^{1}	130
طائرةٌ نفَّاثةٌ قريبةٌ	1.0×10^{3}	150

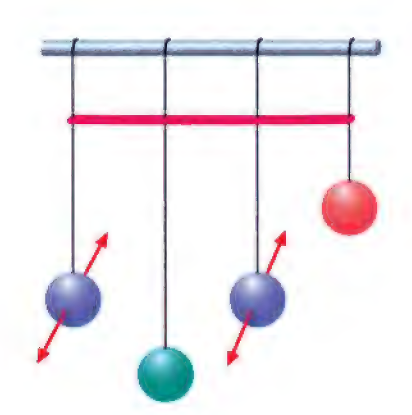
الفيزياءُ والحياة

مصانع تُنبِّهُ قوانينُ البلديَّاتِ إلى عدمِ تعرُّضِ أيِّ عاملٍ إلى مستوياتِ ضجيجٍ يفوقُ 90 dB لفترةٍ زمنيَّةٍ تزيدُ على ثماني ساعاتٍ في اليومِ. هذا يعني أن مصنعًا ضجيجُه 100 dB يجبُ خفضُه 10 dB. افترضْ أن كلَّ آلةٍ تصدرُ الكمِّيَّةَ نفسَها من الضجيجِ. ما النسبةُ المئويَّةُ للآلاتِ التي يجبُ إزالتُها؟ أوضحْ ذلك.

الاهتزازاتُ القسريَّةُ والرنينُ

نكادُ نسمعُ أيَّ صوتٍ يصدرُ عندَ نقرِ وترٍ مشدودٍ ومعزولٍ. لكن عند وضعِ الوترِ نفسِه على الكيتارِ ثم نقرِه، نلاحظُ أن شدَّةَ الصوتِ تزدادُ بشكلٍ هائلٍ. ما سببُ هذا الفرقِ؟ للإجابةِ عن هذا السؤالِ، نأخذُ مجموعةَ بندولاتٍ معلَّقةٍ على قضيبٍ يصلُ بينَها رباطٌ مطّاطيٌّ غيرُ مشدودٍ، كما يظهرُ في **الشكل 10-4**. عندَ تحريكِ أحدِ البندولاتِ، تنتقلُ الاهتزازاتُ عبرَ الرباطِ، فتبدأُ باقي البندولاتِ بالاهتزازِ. تُسمّى هذه الظاهرةُ *الاهتزازَ القسريَّ*.

الأوتارُ المهتزَّةُ في الكيتارِ تدفعُ جسرَ الكيتارِ للاهتزازِ، والجسرُ بدورِه ينقلُ اهتزازاتِه إلى جسمِ الكيتارِ. تُسمّى هذه الاهتزازاتُ القسريَّةُ *اهتزازاتٍ بالتأثيرِ*. بما أن مساحةَ جسمِ الكيتارِ تفوقُ مساحةَ الأوتارِ، فإن اهتزازاتِ الأوتارِ تتمكَّنُ من الانتقالِ إلى الهواءِ بفاعليَّةٍ أكبر. ونتيجةً لذلك، تزدادُ شدَّةُ الصوتِ وتخمدُ اهتزازاتُ الأوتارِ، أسرعَ ممّا لو لم تكنْ متَّصلةً بجسمِ الكيتارِ. يعني ذلك أن جسمَ الكيتارِ يسمحُ بتبادلِ الطاقةِ



الشكل 10-4
عندَ تحريكِ بندولٍ أزرقَ واحدٍ، يتحرَّكُ فقط البندولُ الأزرقُ الآخرُ ذو الطولِ نفسِه، متأرجحًا بسعةٍ أكبرَ، ليصبحَ النظامُ في حالةِ رنينٍ.

بين الأوتارِ والهواءِ بفاعليَّةٍ أكبرَ، فيزيدُ بذلك من شدَّةِ الصوتِ الصادرِ.

في الكيتارِ الكهربائيِّ، تتحوَّلُ اهتزازاتُ الأوتارِ إلى نبضاتٍ كهربائيَّةٍ يمكنُ تضخيمُها بالقدرِ المطلوبِ، وبإمكانِ الكيتارِ الكهربائيِّ أن يُصدرَ أصواتًا شدَّتُها أكبرُ كثيرًا من أصواتِ كيتارٍ صوتيٍّ غيرِ مضخَّمٍ، يستعملُ فقط اهتزازاتِ جسمِ الكيتارِ القسريَّةَ، لزيادةِ شدّةِ الصوتِ من الأوتارِ المهتزَّةِ.

اهتزازةٌ بتردُّدٍ طبيعيٍّ تولِّدُ رنينًا

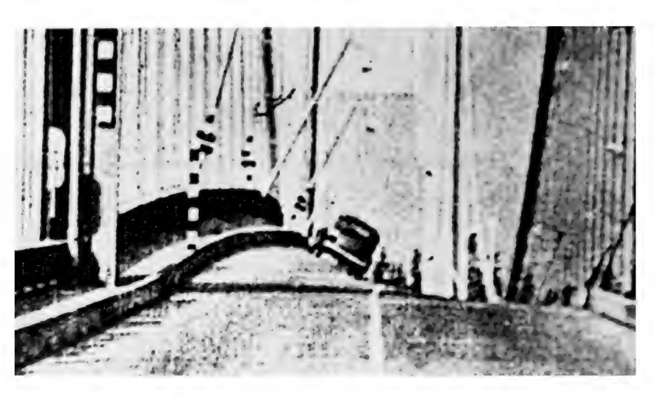
وردَ في فصلِ الموجاتِ، أن تردُّدَ البندولِ يعتمدُ على طولِ الخيطِ. فكلُّ بندولٍ إذًا يهتزُّ بتردُّدٍ معيَّنٍ، يُسمّى *التردُّدَ الطبيعيَّ*. تجدُ في **الشكل 4-10**، أن للبندولَيْن الأزرقَيْن التردُّدَ الطبيعيَّ نفسَه، في حينِ أن البندولَيْن الأحمرَ والأخضرَ لهما تردُّدانِ طبيعيّانِ مختلفان. عند تأرجحِ البندولِ الأزرقِ الأوَّلِ، يهتزُّ البندولُ الأخضرُ والأحمرُ قليلاً، لكنَّ البندولَ الأزرقَ الثانيَ، يتأرجحُ بسعةٍ أكبرَ كثيرًا، لأن تردُّدَهُ الطبيعيَّ يطابقُ تردُّدَ البندولِ الذي كانَ بدايةً في حالةِ حركةٍ. يُقالُ إن هذا النظامَ في حالةِ **رنينٍ** resonance. وبما أن الطاقةَ تنتقلُ من بندولٍ إلى آخرَ فإن سعةَ اهتزازةِ البندولِ الأزرقِ الأوَّلِ ستنخفضُ، بينَما تزدادُ سعةُ البندولِ الأزرقِ الثاني.

الرنين

ظاهرةٌ تحدثُ عندَما يتطابقُ تردُّدُ نظامٍ معيَّنٍ عند تطبيقِ قوةٍ عليه مع التردُّدِ الطبيعيِّ له مسبِّبًا اهتزازاتٍ ذاتَ سعةٍ هائلةٍ.

مثالٌ لافتٌ هو الرنينُ الذي حدثَ عام 1940، عندَما اهتزَّ جسرُ تاكوما ناروز في واشنطن بسببِ الرياحِ، انظرِ **الشكلَ 4-11**، حيث تنامَت موجاتٌ واقفةٌ في الجسرِ بسببِ رياحٍ عاتيةٍ، مما جعلَ الجسرَ يتأرجحُ بأحدِ تردُّداتِه الطبيعيَّةِ، وازدادَتْ سعةُ الاهتزازاتِ إلى أن تداعى الجسرُ. مثالٌ آخرُ على الرنينِ يعودُ إلى عام 1989 خلالَ زلزالِ لوما بريتا كاليفورنيا، عندَما انهارَ جزءٌ من السطحِ الأعلى للطريقِ السريعةِ نتيجةَ موجاتٍ زلزاليَّةٍ تردُّدها 1.5 Hz وهو قريبٌ جدًّا من التردُّدِ الطبيعيِّ لهذا الجزءِ من الطريقِ السريعةِ.





الشكل 4-11

في نوفمبر 1940 تداعى جسرُ تاكوما ناروز المعلَّقُ بعد أربعةِ أشهرٍ فقط من افتتاحِه. موجاتٌ واقفةٌ سببُها رياحٌ عاتيةٌ حرَّكتِ الجسرَ وجعلتْه ينهارُ.

نشاط عملي سريع

الرنين

المواد

- ✓ جهازُ تأرجح (بندول)

استعمل بندولاً وادفعه بقوى مختلفة عندما يصلُ إلى أقصى ارتفاعٍ في كلِّ مرة، ولاحظْ تأثيرَ القوَّةِ في سعةِ اهتزازةِ البندول.

لاحظْ تأثيرَ القوَّةِ في سهولةِ ازديادِ سعةِ الاهتزازة. هل هناكَ قوى أكثرُ فاعليَّةً في زيادةِ سعةِ اهتزازةِ البندول من معدَّلاتٍ أخرى؟ يجب أن تستنتجَ أن تأثيرَ القوى يكونُ أكثرَ فاعليَّةً عندما يتطابقُ تردُّدُ البندولِ الناتج عن القوةِ مع التردُّدِ الطبيعيِّ للبندول. أوضحْ كيف تدعمُ نتائجُك التصريحَ القائلَ بأن الرنينَ يكونُ أفضلَ عندما يتطابقُ تردُّدُ القوةِ المطبَّقةِ مع التردُّدِ الطبيعيِّ للنظام.

مراجعةُ القسم 2-4

1. عندما يزدادُ مستوى شدَّةِ الصوتِ لحركةِ المرورِ في الشارعِ من 40 dB إلى 60 dB، فكم تزيدُ شدَّةُ الضجيجِ؟

2. يهتزُّ الفرعانِ المعدنيَّانِ لشوكةٍ رنَّانةٍ بتردُّدٍ واحدٍ، عندَ طرقِهما. ماذا يحدثُ إذا وُضعَتْ شوكةٌ رنَّانةٌ مهتزَّةٌ قربَ شوكةٍ رنَّانةٍ أخرى تهتزُّ بالتردُّدِ نفسِه؟ أوضحْ ذلك.

3. **تفكيرٌ ناقد:** أيُّ العواملِ التاليةِ يتغيَّرُ عندَما يرتفعُ الصوتُ لمصدر معيّن؟ وأيُّ العواملِ يتغيَّرُ عندَ ارتفاعِ درجةِ الصوتِ؟
   - أ. الشدَّة.
   - ب. سرعةُ موجاتِ الصوتِ.
   - ج. التردُّد.
   - د. مستوى شدَّةِ الصوت.
   - هـ. الطولُ الموجيُّ.
   - و. السعة.

نافذةٌ على الموضوع

فقدانُ حِدَّةِ السمعِ



لدى التعامل مع الأجهزةِ الكهربائيَّةِ، ينبغي وضعُ واقيةِ الأذنِ، لتجنيبِها أيَّ أذى.

يعاني حوالي 10 % من الناسِ فقدانَ حدَّةِ السمعِ بدرجاتٍ متفاوتةٍ. أنواعُ الفقدانِ الأساسيَّةُ هي:

1. فقدانُ موصِّلِ السمعِ.
2. فقدانُ عصبِ السمعِ.
3. فقدانُ حِسِّ السمعِ.

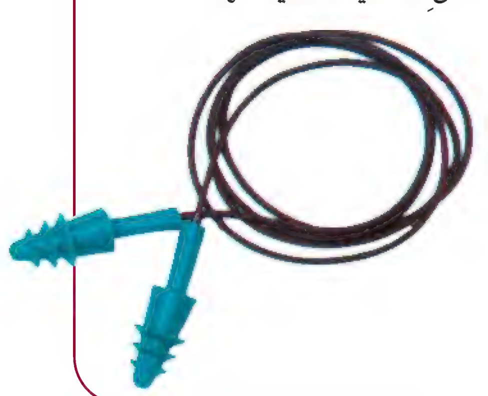
ينتجُ فقدانُ موصِّلِ السمعِ، عن خللٍ في نقلِ موجاتِ الصوتِ عبرَ الأذنِ الخارجيَّةِ، أو نقلِ الاهتزازاتِ في الأذنِ الوسطى، وسببُ الخللِ، في معظمِ الأحيانِ، تضرُّرُ بعضِ أجزاءِ الأذنِ الوسطى أو الخارجيةِ نتيجةَ حادثٍ أو مرضٍ، أو نموٍّ غيرِ سليمٍ لتلكَ الأجزاءِ. يمكن معالجةُ هذا النوعِ بالعقاقيرِ أو الجراحةِ. أما فقدانُ عصبِ السمعِ، فسببُه المشكلاتُ التي تصيبُ العصبَ السمعيَّ الذي ينقلُ الإشاراتِ من الأذنِ الداخليَّةِ إلى الدماغِ. من الأسبابِ الشائعةِ لفقدانِ حدَّةِ السمعِ ما يتعلَّقُ بفقدانِ حسِّ السمعِ الذي يعودُ إلى ضررٍ في الأذنِ الداخليَّةِ، وخصوصًا في خلايا الحسِّ المجهريَّةِ داخلَ قوقعةِ الأذنِ.

قد يبدأُ فقدانُ حِسِّ السمعِ منذُ الولادةِ، وقد يكونُ وراثيًّا أو نتيجةَ مرضٍ أو اضطراباتٍ في النموِّ، لكنَّ مصدرَ الاعتلالِ الأكثرَ شيوعًا لخلايا الحسِّ هو التعرُّضُ للضجيجِ المرتفعِ، في حين أن التعرُّضَ لفترةٍ قصيرةٍ قد يسبِّبُ رنينًا في الأذنَيْن مع تلفٍ مؤقَّتٍ في السمعِ. وبالمقابلِ فإن التعرُّضَ المستمرَّ أو الطويلَ الأمدِ لأنواعٍ من الضجيجِ فوق 70 dB، ومنها ضجيجُ مصادرَ مألوفةٍ مثلِ مجفِّفِ الشعرِ أو قطَّاعةِ العشبِ، يؤدِّي إلى تلفٍ دائمٍ في خلايا الحسِّ في القوقعةِ.

إن خلايا الحسِّ داخلَ القوقعةِ لا تشبهُ شعرَ رأسِك أو يدِك. إنها خلايا أعصابٍ عاليةُ الاختصاصِ لا يمكنُ إصلاحُها أو استبدالُها عندَ تعرُّضِها لتلفٍ أو اعتلالٍ خطيرٍ. ويمكنُ لخلايا حسِّ القوقعةِ أن تتعافى من تلفٍ خفيفٍ. لكن في حالِ تكرارِ التلفِ، حتى وإن كانَ متوسِّطَ الدرجةِ، فقد لا يتسنّى لخلايا الحسِّ أن تتعافى، فتصابُ بضررٍ دائمٍ. لذلك، ومن المهمِّ أن تحميَ نفسَك من فقدانِ حسِّ السمعِ، بالتقليلِ من تعرُّضِك للضجيجِ المرتفعِ، أو باستعمالِ سمّاعتَي الرأسِ أو سداداتِ الأذنِ، التي تسدُّ قناةَ الأذنِ كليًّا، عندَ تعرُّضِك للضجيجِ المرتفعِ.

يحدثُ فقدانُ حسِّ السمعِ تدريجيًّا في العادةِ، وقد يستغرقُ 20 سنةً أو أكثرَ. وبما أن خلايا الحسِّ التي تستجيبُ لأصواتٍ ذاتِ درجةٍ عاليةٍ أقصرُ وأرقُّ، فإن أوَّلَ ما تفقدُه هو الحساسيَّةُ لأصواتٍ بتردُّداتٍ تقاربُ 20 kHz. أما فقدانُ حساسيةِ الأصواتِ ذاتِ التردُّداتِ التي تقاربُ 4 kHz فهو عادةً أوَّلُ ما تلاحظُه، لأن تلك التردُّداتِ تقعُ في المجالِ الأعلى للنطقِ البشريِّ. والأشخاصُ الذين يبدأُ فقدانُ السمعِ لديهم يعانونَ عادةً مشكلاتٍ سمعيَّةً حيالَ أصواتٍ ذاتِ درجةٍ عاليةٍ أو حيالَ سماعِ أحرفٍ معيَّنةٍ مثلِ السينِ والباءِ والفاءِ. مع تقدُّمِ فقدانِ السمعِ يزدادُ فقدانُ الحساسيَّةِ لمجالٍ أوسعَ من الأصواتِ.

وبالرغمِ من أن العلاجَ الشافيَ الحقيقيَّ لفقدانِ حسِّ السمعِ لم يتوفَّرْ إلى الآن، فهناكَ بعضُ وسائلِ العلاجِ المتاحةِ. فوسائلُ *السمعِ* تقومُ بدورِ مضخِّماتِ الصوتِ فتجعلُ الأصواتَ التي تلتقطُها الأذنُ أكثرَ ارتفاعًا. وتهدفُ أجهزةُ *السمعِ المساعِدةُ* إلى تضخيمِ مجالٍ صغيرٍ معيَّنٍ من التردُّداتِ للأشخاصِ الذين يعانونَ فقدانَ سمعٍ جزئيًّا. أما عملياتُ الزرعِ في القوقعةِ فتستخدمُ إلكترودًا يُزرعُ جراحيًّا داخلَ القوقعةِ، من خلالِ ثقبٍ خلفَ الأذنِ الخارجيَّةِ، فتحثُّ الإشاراتُ الكهربائيَّةُ في الإلكترودِ العصبَ السمعيَّ مباشرةً، مجاوزةً بالفعلِ الخلايا الحسِّيَّةَ كلَّها.





النغماتُ التوافقيَّةُ
Harmonics

3-4 أهداف القسم

- يميِّزُ بين المتسلسلاتِ التوافقيَّةِ للأنابيبِ المغلقةِ والمفتوحةِ.
- يحسبُ النغماتِ التوافقيَّةَ لخيطٍ مهتزٍّ ولأنابيبَ مغلقةٍ ومفتوحةٍ.
- يربطُ النغماتِ التوافقيَّةَ بالجرْسِ (نوع الصوت).

الموجاتُ الواقفةُ على خيطٍ مهتزٍّ

ذكرْنا في فصلِ «الاهتزازاتُ والموجاتُ» أن الكثيرَ من الموجاتِ الواقفةِ تستطيعُ أن تتشكَّلَ عندَ تثبيتِ خيطٍ مشدودٍ من طرفَيْه، وجعلِه يهتزُّ. تتألَّفُ الاهتزازاتُ على وترٍ عادةً من عدَّةِ موجاتٍ واقفةٍ معًا في الوقتِ نفسِه، ولكلٍّ منها طولٌ موجيٌّ وتردُّدٌ مختلفٌ، وهذا يعني أن الأصواتَ التي تسمعُها من آلةٍ وتريَّةٍ، حتى تلك التي تصدرُ بدرجةٍ واحدةٍ، تتألَّفُ في الواقعِ من تردّداتٍ مضاعَفةٍ.

يُظهرُ **الجدولُ 3-4** على الصفحةِ التاليةِ عدةَ اهتزازاتٍ محتملةٍ على خيطٍ مثاليٍّ. طرفا الخيط اللذان لا يهتزّان يجبُ أن يكونا دائمًا عقدتَين (N). أما أبسطُ اهتزازةٍ قد تحدثُ، فتظهرُ في الصفِّ الأولِ من **الجدول 3-4**. وفي هذه الحالةِ، يتعرَّضُ مركزُ الخيطِ إلى إزاحةٍ قصوى، فهو بالتالي بطنٌ (A). وبما أن المسافةَ بينَ عقدتَيْن متتاليتَيْن هي دائمًا نصفُ طولٍ موجيٍّ، فإن طولَ الخيطِ (L) يجبُ أن يساويَ $\lambda_1/2$. وبذلك يصبحُ الطولُ الموجيُّ ضعفَ طولِ الخيطِ ($\lambda_1 = 2L$).

وكما وردَ في الفصلِ الثالثِ، فإن سرعةَ الموجةِ تساوي التردُّدَ مضروبًا في الطولِ الموجيِّ. ويمكنُ إعادةُ ترتيبِ المعادلةِ كما يلي:

$$v = \lambda f \quad \text{إذًا} \quad f = \frac{v}{\lambda}$$

عندَ تعويضِ قيمةِ الطولِ الموجيِّ في المعادلةِ السابقةِ للتردُّدِ، نحصلُ على:

$$\text{التردُّد الأساسي} = f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{2L}$$

تردُّدُ الاهتزازةِ هذا يُسمّى **التردُّدَ الأساسيَّ** fundamental frequency للخيطِ المهتزِّ. بما أن التردُّدَ يتناسبُ عكسيًّا مع الطولِ الموجيِّ، وبما أن الطولَ الموجيَّ أكبرُ فإن التردُّدَ الأساسيَّ يصبحُ أقلَّ تردُّدٍ محتملٍ للموجةِ الواقفةِ على هذا الخيطِ.

التردُّدُ الأساسيُّ

أقلُّ تردُّدٍ محتملٍ للموجةِ الواقفةِ.

النغماتُ التوافقيَّةُ مضاعَفاتٌ تكامليَّةٌ للتردُّدِ الأساسيِّ

الموجةُ الواقفةُ التاليةُ المحتملةُ للخيطِ تظهرُ في الصفِّ الثاني من **الجدول 3-4**. في هذه الحالة، يكونُ هناكَ ثلاثُ عقدٍ بدلَ عقدتَيْن، لذلك يساوي طولُ الخيطِ طولاً موجيًّا واحدًا. وبما أن هذا الطولَ الموجيَّ يساوي نصفَ الطولِ الموجيِّ السابقِ، يكونُ تردُّدُ هذه الموجةِ ضعفَ التردُّدِ الأساسيِّ.

$$f_2 = 2f_1$$

الجدول 3-4 المتسلسلاتُ التوافقيَّة

N A N	$\lambda_1 = 2L$	f_1	الترددُ الأساسيُّ (أو النغمةُ التوافقيَّةُ الأولى)
N A N A N	$\lambda_2 = L$	$f_2 = 2f_1$	النغمةُ التوافقيَّةُ الثانيةُ
N A N A N A N	$\lambda_3 = \frac{2}{3}L$	$f_3 = 3f_1$	النغمةُ التوافقيَّةُ الثالثةُ
N A N A N A N A N	$\lambda_4 = \frac{1}{2}L$	$f_4 = 4f_1$	النغمةُ التوافقيَّةُ الرابعةُ

ويستمرُّ هذا النمطُ من البطون والعقد، فيكونُ تردُّدُ الموجةِ الواقفةِ الظاهرةِ في الصفِّ الثالثِ من **الجدول 3-4** ثلاثةَ أمثالِ التردُّدِ الأساسيِّ. بشكلٍ عامٍّ، يكونُ لتردُّداتِ أنماطِ الموجاتِ الواقفةِ كلِّها مضاعفاتٌ تكامليَّةٌ للتردُّدِ الأساسيِّ. تشكِّلُ تلك التردُّداتُ **مُتسلسلاتٍ توافقيَّةً** harmonic series. التردُّدُ الأساسيُّ (f_1) يقابلُ النغمةَ التوافقيَّةَ الأولى. والتردُّدُ الثاني (f_2) يقابلُ النغمةَ التوافقيَّةَ الثانيةَ، وهكذا...

بما أن كلَّ نغمةٍ توافقيَّةٍ مضاعَفٌ تكامليٌّ للتردُّدِ الأساسيِّ، فمن الممكنِ تعميمُ معادلةِ التردُّدِ الأساسيِّ، لتشملَ المتسلسلَ التوافقيَّ بأكمله. إذًا، $f_n = nf_1$ حيث f_1 هي التردُّدُ الأساسيُّ ($f_1 = \frac{v}{2L}$)، و f_n هي تردُّدُ النغمةِ التوافقيَّةِ ذاتِ الرقمِ n. يُكتبُ الشكلُ العامُّ للمعادلةِ على النحوِ التالي:

المتسلسلاتُ التوافقيَّةُ

متسلسلاتٌ من التردُّداتِ تشملُ التردُّدَ الأساسيَّ ومُضاعَفاتِه.

المتسلسلةُ التوافقيَّةُ للموجاتِ الواقفةِ على خيطٍ مهتزٍّ

$$f_n = n\frac{v}{2L} \quad ، \quad n = 1,2,3...$$

$$\text{التردُّد} = \text{رقمَ التوافقية} \times \frac{\text{(سرعة الموجات في الخيط)}}{\text{(طول الخيطِ المهتز)(2)}}$$

لاحظْ أن v في المعادلةِ تمثِّلُ سرعةَ الموجاتِ في الخيطِ المهتزِّ، وليسَ سرعةَ موجاتِ الصوتِ في الهواءِ. إذا اهتزَّ الخيطُ بأحدِ هذه التردُّداتِ، يكونُ لموجاتِ الصوتِ الصادرةِ في الهواءِ المحيطِ بالخيطِ التردُّدُ نفسُه. وسرعةُ هذه الموجاتِ هي سرعةُ موجاتِ الصوتِ في الهواءِ. ويكون طولُها الموجيُّ يساوي السرعةَ مقسومةً على التردُّدِ.

الموجاتُ الواقفةُ في عمودٍ هوائيٍّ

يمكنُ أيضًا تشكيلُ موجاتٍ واقفةٍ في أنبوبٍ داخلَه هواءٌ (عمودٌ هوائيٌّ) كالبوقِ أو المزمارِ. بينما تنتقلُ بعضُ الموجاتِ داخلَ الأنبوبِ، تنعكسُ موجاتٌ أخرى في اتِّجاهٍ معاكسٍ لتلتقيَ الموجاتِ الساقطة، فتشكِّلُ موجاتٍ واقفة.

النغماتُ التوافقيَّةُ في أنبوبٍ مفتوحِ الطرفَيْن

المتسلسلةُ التوافقيَّةُ الموجودةُ في أنبوبٍ هوائيٍّ تعتمدُ على طرفِه العاكس للموجات، هل هو مفتوح أم مغلق؟ فإذا كانَ الطرفُ مفتوحًا، كما يظهرُ في **الشكل 4-12**، يكونُ لجزيئاتِ الهواءِ حرِّيَّةٌ كاملةٌ في الحركة. لذا يتشكَّلُ بطنٌ (من الإزاحة) عندَ هذا الطرفِ. وإذا كانَ الأنبوبُ مفتوحَ الطرفَيْن، يتشكَّلُ بطنٌ عندَ كلِّ طرفٍ، وهذا الوضعُ معاكسٌ تمامًا لحالةِ الوترِ المشدودِ والمثبَّتِ عندَ طرفَيه، حيثُ توجد العقدتان.

بما أن المسافةَ بينَ عقدتَيْن متتاليتَيْن ($\frac{1}{2}\lambda$) تساوي المسافةَ بينَ بطنَيْن متتاليَيْن، يصبحُ شكلُ نمطِ الموجاتِ الواقفةِ في أنبوبٍ مفتوحِ الطرفَين شبيهًا بالوترِ المهتزِّ. وتتوفَّرُ بالتالي كلُّ المتسلسلاتِ التوافقيَّةِ في هذه الحالةِ، كما يظهرُ في **الشكل 4-12**، وتكونُ معادلتُنا السابقةُ للمتسلسلةِ التوافقيَّةِ لوترٍ مهتزٍّ صالحةً للاستعمال.



هل تعلم؟

البوقُ شبيهٌ بأنبوبٍ مفتوحِ الطرفَين. عندَ سدِّ جميعِ ثقوبِه يكونُ طولُ عمودِ الهواءِ المهتزِّ مساويًا تقريبًا لطولِ البوق. عندَ فتحِ الثقوبِ واحدًا بعدَ الآخر، يتضاءلُ طولُ عمودِ الهواءِ، ويزدادُ بذلك الترددُ الأساسيُّ.

المتسلسلةُ التوافقيَّةُ للموجاتِ الواقفةِ في أنبوبٍ مفتوحِ الطرفَيْن

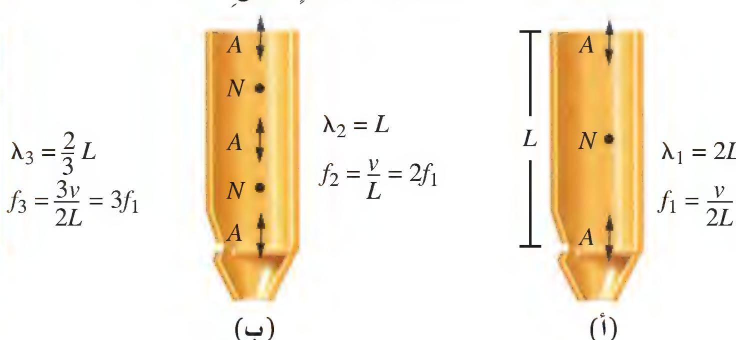
(النغماتُ التوافقيَّةُ كلُّها)

$$f_n = n\frac{v}{2L} \quad ، \quad n = 1,2,3...$$

التردُّد = رقمَ التوافقية × $\frac{\text{(سرعة الصوت في الأنبوب)}}{(2)\text{(طول عمود الهواء المهتز)}}$

في هذه المعادلةِ، يمثِّلُ L طولَ عمودِ الهواءِ المهتزِّ. فكما يمكنُ لتردُّدِ الآلةِ الوتريَّةِ الأساسيِّ أن يتغيَّرَ بتغيُّرِ طولِ الوترِ، كذلك يمكنُ أن يتغيَّرَ التردُّدُ الأساسيُّ لبضعِ آلاتٍ موسيقيَّةٍ مصنوعةٍ من النحاسِ الأصفرِ، وأخرى هوائيَّةٍ مصنوعةٍ من الخشبِ، بتغيُّرِ طولِ عمودِ الهواءِ المهتزِّ.

التوافقيّاتُ في أنبوبٍ مفتوحِ الطرفَيْن



الشكل 4-12

في أنبوبٍ مفتوحِ الطرفَيْن، يكونُ كلُّ طرفٍ بطنًا، وتكونُ جميعُ التوافقيّاتِ موجودةً. أما الظاهرةُ منها هنا فهي التوافقيّاتُ الأولى (أ) والثانيةُ (ب) والثالثةُ (ج).

النغماتُ التوافقيَّةُ في أنبوبٍ مغلق الطرفِ الواحدِ

عندَما يكونُ أحدُ طرفَيْ أنبوبِ الأُرْكُن مغلقًا، كما يظهرُ في **الشكل 4-13**، تُحصرُ حركةُ جزيئاتِ الهواءِ في هذا الطرفِ فتجعلُه عقدةً، وفي هذه الحالةِ يصبحُ أحدُ طرفَي الأنبوبِ عقدةً والآخرُ بطنًا. في النتيجةِ، يمكنُ أن تتشكَّلَ مجموعةٌ مختلفةٌ من الموجاتِ الواقفةِ.

يظهرُ في **الشكل 4-13** (أ) أن أبسطَ موجةٍ واقفةٍ محتملةٍ تحدثُ في هذا الأنبوبِ هي الموجةُ التي يكونُ فيها طولُ الأنبوبِ مساويًا لربعِ الطولِ الموجيِّ، وهذا يعني أن الطولَ الموجيَّ لهذه الموجةِ الواقفةِ يساوي أربعةَ أمثالِ طولِ الأنبوبِ. وفي هذهِ الحالةِ، يساوي الترددُّ الأساسيُّ السرعةَ مقسومةً على أربعةِ أمثالِ طولِ الأنبوبِ.

$$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{4L}$$

في الحالةِ التي يظهرُها **الشكلُ 4-13** (ب)، يساوي طولُ الأنبوبِ ثلاثةَ أرباعِ الطولِ الموجيِّ، أي إن الطولَ الموجيَّ يساوي أربعةَ أثلاثِ طولِ الأنبوبِ $(\lambda_3 = \frac{4}{3}L)$. وبعدَ تعويضِ هذه القيمةِ في معادلةِ الترددُّ نحصلُ على ترددُّ التوافقيَّةِ.

$$f_3 = \frac{v}{\lambda_3} = \frac{v}{\frac{4}{3}L} = \frac{3v}{4L} = 3f_1$$

ترددُّ هذه التوافقيَّةِ يساوي ثلاثةَ أمثالِ الترددُّ الأساسيِّ، وبعد إعادةِ الحسابِ للحالةِ الظاهرةِ في **الشكل 4-13** (ج)، نحصلُ على ترددُّ يساوي خمسةَ أمثالِ الترددُّ الأساسيِّ. ويعني ذلك أن التوافقيّاتِ المفردةَ هي وحدَها تهتزُّ في أنبوبٍ مغلقِ الطرفِ الواحدِ. نعمِّمُ معادلةَ المتسلسلةِ التوافقيَّةِ لأنبوبٍ مغلقِ الطرفِ الواحدِ كما يلي:

المتسلسلةُ التوافقيَّةُ لأنبوبٍ مغلقِ الطرفِ الواحدِ

(النغماتُ التوافقيَّةُ المفردةُ فقط)

$$f_n = n\frac{v}{4L} \quad , \quad n = 1,3,5...$$

الترددُّ = رقمَ التوافقيّة × (سرعةُ الصوتِ في هواءِ الأنبوبِ) / (4)(طولُ عمودِ الهواءِ المهتز)

نشاط عملي سريع

أنبوبٌ مغلقُ الطرفِ الواحدِ

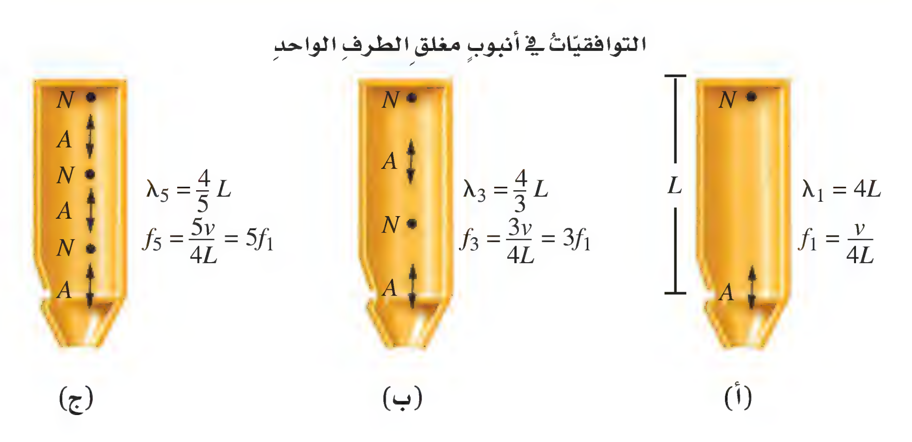
الموادّ

- ✓ ماصّة شراب
- ✓ مقصّ

إرشاداتُ السلامة

احترسْ دائمًا عندَ استعمالِ المقصّ.

قصَّ زوايا أحدِ طرفي الماصّةِ ليصبحَ مستدقًّا، كما يظهرُ أعلاه. اضغطْ على هذا الطرفِ ليصبحَ مسطَّحًا، تحصلْ على مزمارٍ بلسان. ضعْ شفتَيك حولَ الطرفِ المستدقِّ وانفخْ داخلَ الماصّة. عندَ سماعِك نغمةً ثابتةً ابدأْ بتأنٍّ قطعَ أجزاءٍ من الطرفِ الآخرِ من الماصّة. حاولْ إبقاءَ شفتَيك ضاغطتَيْن بالمقدارِ نفسه. كيف تتغيَّرُ درجةُ الصوتِ كلما قَصُرت الماصّةُ؟ كيف تفسِّرُ هذا التغيُّرَ في الدرجة؟ باستطاعتك الحصولُ على أكثرَ من نغمةٍ واحدةٍ بوساطةِ أيِّ طولٍ معيَّنٍ من الماصّة. كيف يحدثُ ذلك؟



الشكل 4-13

في أنبوبٍ مغلقِ الطرفِ الواحدِ، يكونُ الطرفُ المغلقُ عقدةً، والطرفُ المفتوحُ بطنًا. في هذه الحالةِ توجدُ التوافقيّاتُ المفردةُ فقط: الأولى (أ) والثالثةُ (ب) والخامسةُ (ج)، كما يظهرُ في الشكل.

مثال 4 (ب)

التوافقيّات

المسألة

ما تردُّدُ أوّلِ ثلاث نَغمات توافقيَّة في أنبوبٍ مفتوحِ الطرفَيْن طولُه 2.45 m؟ وما تردُّدُها في هذا الأنبوبِ عندَ إغلاقِ أحدِ طرفَيْه؟ افترضْ أن سرعةَ الصوتِ في هواءِ الأنبوبِ 345 m/s.

الحلّ

1. أعرِّف

المعطى: $L = 2.45$ m $\quad v = 345$ m/s

المجهول: في حالةِ الأنبوبِ المفتوحِ الطرفَيْن $f_1 = ?$ $\quad f_2 = ?$ $\quad f_3 = ?$

في حالةِ الأنبوبِ المغلقِ الطرفِ الواحدِ $f_1 = ?$ $\quad f_3 = ?$ $\quad f_5 = ?$

2. أخطِّط

أختارُ معادلةً أو موقفًا: في حالةِ الأنبوبِ المفتوحِ الطرفَيْن، يُحسبُ التردُّدُ الأساسيُّ باستعمالِ معادلةِ المتسلسلةِ التوافقيَّةِ كاملة.

$$f_n = n\frac{v}{2L} \quad ، \quad n = 1,2,3...$$

وفي حالةِ الأنبوبِ المغلقِ الطرفِ الواحدِ، أستعملُ المعادلةُ التالية:

$$f_n = n\frac{v}{4L} \quad ، \quad n = 1,3,5...$$

في الحالتَين أحسبُ التوافقيَّتَيْن الثانيةَ والثالثةَ بضربِ رقمِ التوافقيَّةِ في التردُّدِ الأساسيّ.

3. أحسب

أعوِّضُ القيمَ في المعادلةِ وأحلّ:

في حالةِ الأنبوبِ المفتوحِ الطرفَيْن:

$$f_n = n\frac{v}{2L} = (1)\left(\frac{345 \text{ m/s}}{(2)(2.45 \text{ m})}\right) = \boxed{70.4 \text{ Hz}}$$

التوافقيَّتان التاليتان هما الثانيةُ والثالثةُ:

$$f_2 = 2f_1 = (2)(70.4 \text{ Hz}) = \boxed{141 \text{ Hz}}$$

$$f_3 = 3f_1 = (3)(70.4 \text{ Hz}) = \boxed{211 \text{ Hz}}$$

في حالةِ الأنبوبِ المغلقِ الطرفِ الواحدِ:

$$f_n = n\frac{v}{4L} = (1)\left(\frac{345 \text{ m/s}}{(4)(2.45 \text{ m})}\right) = \boxed{35.2 \text{ Hz}}$$

التوافقيَّتان التاليتان المحتملتان هما الثالثةُ والخامسةُ:

$$f_3 = 3f_1 = (3)(35.2 \text{ Hz}) = \boxed{106 \text{ Hz}}$$

$$f_5 = 5f_1 = (5)(35.2 \text{ Hz}) = \boxed{176 \text{ Hz}}$$

ملاحظة

تأكَّدْ من استعمالِ أرقامِ التوافقيّاتِ الصحيحةِ في كلِّ حالة. فالأنبوبِ مفتوحِ الطرفَين n = 1,2,3,.... وفي الأنبوبِ المغلقِ الطرفِ الواحدِ تتشكَّلُ التوافقيّاتُ المفردةُ فقط، بالتالي n = 1,3,5,....

4. أقيِّم

في الأنبوبِ المفتوحِ الطرفَيْن يساوي أوّلُ طولٍ موجيٍّ محتمل $2L$. وفي الأنبوبِ المغلقِ الطرفِ الواحدِ، يساوي أوّلُ طولٍ موجيٍّ محتمل $4L$. وبما أن التردُّدَ والطولَ الموجيَّ يتناسبان عكسيًّا، فالتردُّدُ الأساسيُّ في الأنبوبِ المفتوحِ الطرفَيْن يكونُ ضعفَ التردُّدِ في الأنبوبِ المغلقِ الطرفِ الواحدِ، أي $(2)(35.2) = 70.4$.

تطبيق 4 (ب)

التوافقيّات

1. ما الترددُ الأساسيُّ في أنبوبٍ هوائيٍّ مغلقِ الطرفِ الواحدِ طولُه 0.20 m إذا كانَت سرعةُ الصوتِ في الأنبوبِ 352 m/s؟

2. يبلغُ طولُ بوقٍ (أنبوبٍ مفتوحِ الطرفَيْن) 66.0 cm تقريبًا، ما تردُّدُ أوّلِ ثلاثِ توافقيّاتٍ للبوقِ عندَما تكونُ جميعُ المفاتيحِ مغلقةً، بحيثُ يجعلُ طولَ عمودِ الهواءِ المهتزِّ يساوي تقريبًا طولَ البوقِ؟ (سرعةُ الصوتِ داخلَ البوقِ 340 m/s).

3. ما سرعةُ الموجاتِ على وترٍ، إذا كانَ التردُّدُ الأساسيُّ 440 Hz وطولُ الوترِ 50.0 cm؟

التوافقيّاتُ تحدّدُ نوعَ الصوتِ أو جَرْسَه

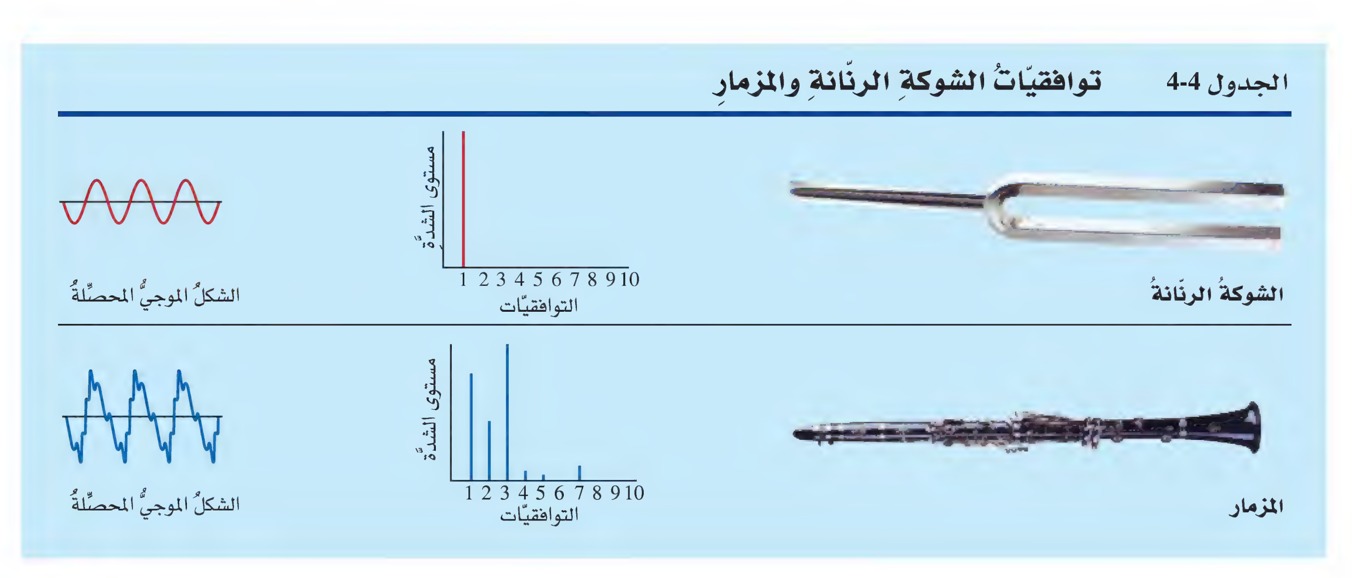
يظهرُ **الجدولُ 4-4** توافقيّاتِ الشوكةِ الرنّانةِ والمزمارِ عندَما يصدرُ عن كلٍّ منهما النغمةُ الموسيقيَّةُ A-الطبيعيَّةُ. لكلِّ آلةٍ خليطٌ خاصٌّ مميَّزٌ من توافقيّاتٍ مختلفةِ الشدَّةِ.

التوافقيّاتُ الظاهرةُ في العمودِ الثاني في **الجدول 4-4** تُجمعُ معًا، تبعًا لمبدأ التراكبِ، لتعطيَ شكلاً موجيًّا محصِّلةً، وهو الذي يظهرُ في العمودِ الثالثِ. وبما أن الشوكةَ الرنَّانةَ تهتزُّ فقطْ بتردُّدٍ أساسيٍّ، فيكونُ شكلُها الموجيُّ منحنًى جيبيًّا. الأشكالُ الموجيةُ لآلاتٍ أخرى تبدو أكثرَ تعقيدًا، لأنها تتألفُ من عدَّةِ توافقيّاتٍ لكلٍّ منها شدَّةٌ مختلفةٌ. الشكلُ الموجيُّ لكلِّ توافقيَّةٍ منفردةٍ هو منحنى جيبيٌّ، لكنَّ الموجةَ المحصلةَ أكثرُ تعقيدًا من أن تبدوَ منحنًى جيبيًّا، لأن لكلِّ شكلٍ موجي، بمفردِه، تردُّدًا مختلفًا.

يُسمّى خليطُ التوافقيّاتِ الذي ينتجُ صوتًا مميَّزًا لآلةٍ موسيقيَّةٍ نوعَ الصوتِ أو **الجَرْس** timbre. فصوتُ المزمارِ يختلفُ عن صوتِ الشوكةِ الرنّانةِ بسببِ الجَرْسِ، وإن كانا يصدرانِ النغمةَ نفسَها وبالحجمِ نفسِه. وهذا يعني أن وفرةَ توافقيّاتِ معظمِ الآلاتِ تُعطي صوتًا أكثرَ غنًى من صوتِ الشوكةِ الرنّانةِ.

الجَرْسُ (نوعُ الصوتِ)
النغمةُ التي تنتجُ عن مزجِ توافقيّاتٍ مختلفةِ الشدَّةِ.

الجدول 4-4 **توافقيّاتُ الشوكةِ الرنّانةِ والمزمارِ**



تتغيَّرُ شدَّةُ التوافقيَّةِ لآلةٍ موسيقيَّةٍ تبعًا للتردُّدِ وسعةِ الاهتزازةِ وعواملَ أخرى متعدِّدةٍ.

مع أن الأشكالَ الموجيَّةَ للمزمارِ أكثرُ تعقيدًا من الأشكالِ الموجيَّةِ للشوكةِ الرنّانةِ، فإننا نلاحظُ أن كلاًّ منها يتألَّفُ من أنماطٍ نسقيَّةٍ متكرِّرةٍ. تلك الأشكالُ الموجيَّةُ تُسمّى دوريَّةً. تتشكَّلُ الأنماطُ لأن كلَّ تردُّدٍ هو مضاعفٌ تكامليٌّ للتردُّدِ الأساسيِّ.

التردُّدُ الأساسيُّ يحدِّدُ درجةَ الصوتِ

درسْنا في القسمِ 4-1 أن تردُّدَ الصوتِ يحدِّدُ درجتَه. ففي الآلاتِ الموسيقيَّةِ، يحدِّدُ التردُّدُ الأساسيُّ للاهتزازةِ، فعليًّا، درجةَ الصوتِ. التوافقيّاتُ الأخرى تُسمّى أحيانًا *نغماتٍ توافقيَّةً*. في مقياسِ السلَّمِ الموسيقيِّ 12 علامةً، لكلٍّ منها تردُّدُه الخاصُّ، وتردُّدُ العلامةِ الثالثةَ عشرةَ يساوي تمامًا ضعفَ تردُّدِ العلامةِ الأولى. ومعًا تشكِّلُ العلاماتُ الثلاثَ عشرةَ ما يُسمّى *الجوابَ*. وفي الآلاتِ الوتريَّةِ والنغميَّةِ المفتوحةِ الطرفِ، يقابلُ تردُّدُ التوافقيَّةِ الثانيةِ للعلامةِ تردُّدَ الجوابِ فوقَ تلكَ العلامةِ.



نافذةٌ على الموضوع

الترديد

تُصمَّمُ مباني الاجتماعاتِ العامَّةِ والمساجدُ وقاعاتُ الحفلاتِ والمكتباتُ لأهدافٍ مختلفةٍ. فبينما تهدفُ إحداها لإحياءِ حفلةٍ، تصمَّمُ الأخرى لتُستعملَ كقاعةِ محاضراتٍ تسمحُ للجميعِ بسماعِ المُحاضرِ من مكانِه.

وغالبًا ما تصمَّمُ الغرفُ بشكلٍ يسمحُ لصوتِ الخطيبِ أو المتحدِّثِ أن يرتدَّ بعدَ اصطدامِه بالسقفِ والجدرانِ والأرضِ. هذا الصدى المتكرِّرُ يُسمّى *ترديدًا*. أما زمنُ الترديدِ فهو الزمنُ اللازمُ لينخفضَ مستوى شدَّةِ الصوتِ بـ 60 dB.

من أجلِ إلقاءِ خطبةٍ يجبُ أن تصمَّمَ القاعةُ بشكلٍ يكونُ فيه زمنُ الترديدِ قصيرًا نسبيًّا. فقد يؤدّي الصدى المتكرِّرُ إلى تشويشٍ عندَ المستمعين.

لهذهِ الأسبابِ جميعِها تلاحظُ فرقًا في تأثيثِ السقوفِ والجدرانِ تبعًا لهدفِ استعمالِ الغرفِ أو القاعاتِ. فالسقوفُ المصمَّمةُ لترديدٍ عالٍ هي عادةٌ مسطَّحةٌ وصلبةٌ. أما سقوفُ المكتباتِ والأماكنِ الهادئةِ، فهي غالبًا ما تكونُ ناعمةَ الملمسِ ومغطّاةً بمادةٍ ممتصَّةٍ للصوتِ. الأثاثُ المبطَّنُ والنباتاتُ الداخليَّةُ يتمُّ أيضًا توزيعُها في الداخلِ لامتصاصِ الصوتِ. تؤدّي جميعُ هذه العواملِ المختلفةِ إلى توفيرِ وظيفةٍ سمعيّةٍ للغرفة.

مراجعةُ القسم 3-4

1. للنغمةِ C الوسطى على وترٍ تردُّدٌ أساسيٌّ يساوي 262 Hz. ما تردُّدُ التوافقيَّةِ الثانيةِ لهذهِ النغمةِ؟

2. إذا كانَ طولُ الوترِ في السؤالِ 1 يساوي 66.0 cm، فما سرعةُ الموجاتِ على هذا الوترِ؟

3. يُعدُّ طرفُ المزمارِ عقدةً، وأوّلُ ثقبٍ غيرِ مسدودٍ بطنًا. أما المزمارُ فيُعدُّ أنبوبًا مغلقَ الطرفِ الواحد. ما المتسلسلاتُ التوافقيَّةُ المتكوِّنةُ في المزمارِ؟

4. **تفكيرٌ ناقد:** أيٌّ مما يلي يختلفُ بين البوقِ والمزمارِ عندَ عزفِهما نغماتٍ لها التردُّدُ الأساسيُّ نفسُه؟
   أ. الطولُ الموجيُّ للتوافقيَّةِ الأولى في الهواءِ.
   ب. التوافقيّاتُ الموجودةُ.
   ج. شدَّةُ كلِّ توافقيَّةٍ.
   د. سرعةُ الصوتِ في الهواءِ.

ملخّصُ الفصل 4

مصطلحاتٌ أساسيَّة

- الانضغاط Compression (ص 98)
- التخلخل Rarefaction (ص 98)
- درجةُ الصوتِ Pitch (ص 99)
- تأثيرُ دوبلر Doppler effect (ص 103)
- شدَّةُ الموجة Wave intensity (ص 105)
- الديسيبل Decibel (ص 107)
- الرنين Resonance (ص 109)
- التردُّدُ الأساسيُّ Fundamental frequency (ص 112)
- المُتسلسلاتُ التوافقيَّةُ Harmonic series (ص 113)
- الجرْسُ (نوعُ الصوتِ) Timbre (ص 117)

أفكارٌ أساسيَّة

القسم 4-1 الموجاتُ الصوتيةِ

- تردُّدُ الصوتِ يحدِّدُ درجتَه.
- سرعةُ الصوتِ تعتمدُ على الوسطِ.
- الحركةُ النسبيَّةُ بينَ مصدرِ الموجاتِ والمراقبِ تُحدثُ تغيُّرًا ظاهريًّا في التردُّدِ يُسمّى تأثيرَ دوبلر.

القسم 4-2 شدَّةُ الصوتِ والرنينِ

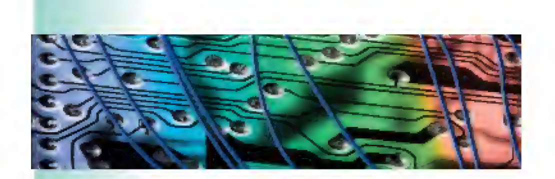
- شدَّةُ الصوتِ لموجةٍ كرويَّةٍ تساوي القدرةَ لكلِ وحدةِ مساحةٍ.
- شدَّةُ الصوتِ عند نقطةٍ تتناسبُ عكسيًّا مع مربَّعِ المسافةِ من مصدرِ الصوتِ.
- الشدَّةُ والتردُّدُ يحدِّدانِ علو أيِّ الأصواتِ مسموعةٌ.
- مستوى شدَّةِ الصوتِ قياسٌ للشدَّةِ النسبيَّةِ على مقياسٍ لوغاريتميٍّ.
- الاهتزازةُ القسريَّةُ ذاتُ التردُّدِ الذي يتطابقُ مع التردُّدِ الطبيعيِّ لنظامٍ تنتجُ رنينًا.

القسم 4-3 النغمات التوافقية

- التوافقيّاتُ مضاعفاتٌ تكامليَّةٌ من التردُّداتِ الأساسيَّةِ.
- الخيطُ المهتزُّ أو الأنبوبُ المفتوحُ الطرفَيْن ينتجانِ جميعَ التوافقيّاتِ.
- الأنبوبُ المغلقُ الطرفِ الواحدِ ينتجُ التوافقيّاتِ المفردةَ فقط.
- عددُ التوافقيّاتِ وشدَّتُها يحدِّدان نوعيَّةَ صوتِ الآلةِ التي تُعرفُ أيضًا بالجرْسِ.

رموزُ المتغيِّراتِ

الكمِّيَّة	الوحدة
شدَّةُ الصوت، I	W/m^2
مستوى شدَّةِ الصوت، β	dB
تردُّدُ التوافقيَّةِ n، f_n	Hz
طولُ خيطٍ مهتزٍّ أو عمودٍ هوائيٍّ، L	m





راجعْ وقيِّمْ

الموجاتُ الصوتية

أسئلةُ مراجعة

1. لماذا تُعدُّ موجاتُ الصوتِ في الهواءِ طوليَّةً؟

2. ارسمِ المنحنى الجيبيَّ لموجةِ الصوتِ التاليةِ.



3. ما الفرقُ بينَ الترددِ ودرجةِ الصوتِ؟

4. ما الفروقُ بينَ موجاتِ الصوتِ تحتَ السمعيَّةِ والمسموعةِ وفوقَ السمعيَّةِ؟

5. فسِّر اعتمادَ سرعةِ الصوتِ على درجةِ حرارةِ الوسطِ. لماذا يُعدُّ هذا الاعتمادُ لافتًا للنظرِ في الغازِ أكثرَ منه في السائلِ أو الصلبِ؟

6. تسمعُ سيارةَ الإسعافِ وأنتَ واقفٌ على الرصيفِ. كيف تحدِّدُ، دون أن تنظرَ، متى تمرُّ بكَ سيارةُ الإسعافِ؟

7. لماذا تكونُ صورُ الأشياءِ التي تنتجُها الموجاتُ فوقَ السمعيَّةِ داخلَ الجسمِ أكثرَ فاعليَّةً من تلكَ التي تنتجُها موجاتُ الصوتِ المسموعةُ؟

أسئلةٌ حولَ المفاهيم

8. إذا خُفِّضَ الطولُ الموجيُّ لمصدرِ صوتٍ إلى نصفِ ما كانَ عليه، فماذا يحدثُ لترددِ الموجةِ؟ وماذا يحدثُ لسرعتِها؟

9. نتيجةً لانفجارٍ بعيدٍ يتحسَّسُ مراقبٌ ارتجاجًا أرضيًّا، ثم يسمعُ دويَّ الانفجارِ. كيف تفسِّرُ هذا التباطؤَ الزمنيَّ؟

10. سيارةُ إطفاءٍ، تُطلقُ صافرتَها، وهي تتحرَّكُ بسرعةِ 40 m/s. تسيرُ أمامَها سيارةٌ أخرى بسرعةِ 30 m/s بالاتجاه نفسه، وأمامَها أيضًا حافلةٌ متوقِّفةٌ إلى جانبِ الطريقِ. أيُّ المراقبَيْنِ يسمعُ الصافرةَ بدرجةٍ أعلى، سائقُ السيارةِ أم سائقُ الحافلةِ؟

11. خفَّاشٌ يطيرُ في اتجاهِ جدارٍ، يُصدرُ صوتًا بتردُّدِ 40 kHz. هل تردُّدُ الصدى الذي يلتقطُهُ الخفَّاشُ أكثرُ من 40 kHz أم أقلُّ منه أم يساويه؟

12. تطلق سيارة إسعاف متوقِّفة صوتًا تردُّده 1200 Hz. ما التردُّد الذي يسمعه مراقب في سيارة أخرى سرعتها بالنسبة إلى سيارة الإسعاف 20 m/s وهي:

أ. تقترب من سيارة الإسعاف؟

ب. تبتعد عن سيارة الإسعاف؟

(استعمل سرعة الصوت في الهواء 340 m/s.)

13. تسير سيارة شرطة بسرعة 90 km/hr وتصدر صافرة تردُّدها 1000 Hz. كم يكون تردُّد الصافرة كما يسمعها شخص يقف على الرصيف ويرى سيارة الشرطة تقترب منه؟ (استعمل سرعة الصوت في الهواء 340 m/s.)

شدَّةُ الصوتِ والرنينِ

أسئلةُ مراجعة

14. ما الفرقُ بينَ الشدَّةِ ومستوى شدَّةِ الصوتِ؟

15. تحتَ أيِّ شروطٍ يحدثُ الرنينُ؟

أسئلةٌ حولَ المفاهيم

16. آلةٌ في مصنعٍ تصدرُ ضجيجًا بمستوى 80 dB. كم آلةً مماثلةً باستطاعتِك إضافتَها إلى المصنعِ دون أن تُجاوزَ 90 dB، الحدَّ المسموحَ به؟

17. لماذا تكونُ شدَّةُ صوتِ الصدى أقلَّ من الصوتِ الأصليِّ؟

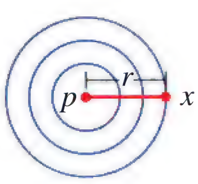
18. لماذا تكونُ الدفعاتُ على أرجوحةٍ أكثرَ فاعليَّةً إذا أعطيَتْ على فتراتٍ زمنيَّةٍ معيَّنةٍ ومنتظمةٍ، مما لو أعطيَتْ عشوائيًّا خلالَ دورةِ الأرجوحةِ؟

19. بالرغمِ من الطلبِ إلى الجنودِ السيرَ بخطوةٍ واحدةٍ، فإنهم يخرقون ذلك عندَ عبورِهم جسرًا. اشرحِ الخطرَ المحتملَ، فيما لو لم يتَّخذِ الجنودُ الحيطةَ.

مسائلُ تطبيقيَّة

20. مدرِّبُ فريقٍ رياضيٍّ ينادي بصوتٍ مرتفع حكمَ المباراةِ الذي يقفُ بعيدًا عنه مسافةَ 5.00 m. إذا كانَتْ قدرةُ صوتِ المدرِّبِ 3.1×10^{-3} W، فما مستوى شدَّةِ الصوتِ الذي يصلُ إلى الحكمِ؟ (ملاحظة: استعملِ الجدولَ 2-4 في هذا الفصل).

21. مكبِّرُ الصوتِ P الظاهرُ في الشكلِ يُصدرُ موجاتٍ صوتيَّةً قدرتُها 100.0 W. ما شدَّةُ موجاتِ الصوتِ على نقطةِ x حيث $r = 10.0$ m؟

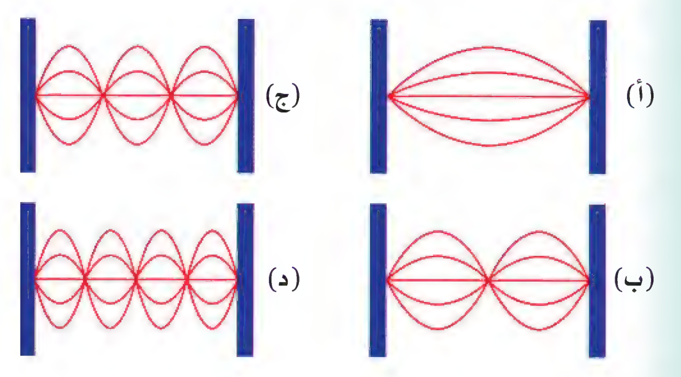


النغمات التوافقية

أسئلةُ مراجعة

22. ما الترددُ الأساسيُّ؟ ما علاقةُ التوافقيّاتِ بالترددِ الأساسيِّ؟

23. الأشكالُ التاليةُ تظهرُ خيطًا مشدودًا ومهتزًّا بعدَّةِ أشكالٍ. إذا كانَ طولُ الخيطِ 2.0 m، فما الطولُ الموجيُّ للموجةِ على الخيطِ في (أ) و (ب) و (ج) و (د)؟



24. لماذا تختلفُ المتسلسلاتُ التوافقيَّةُ لأنبوبٍ مغلقِ الطرفِ الواحدِ عن آخرَ مفتوحِ الطرفَيْنِ؟

أسئلةٌ حولَ المفاهيم

25. لِمَ يكونُ صوتُ اهتزازةِ الوترِ على آلةٍ أعلى ممّا لو كانَ مشدودًا على طاولةٍ؟

26. يسجِّلُ متعلِّمٌ التوافقياتِ العشرَ الأولى لأنبوبٍ. هل يمكنُهُ أن يحدِّدَ إن كانَ الأنبوبُ مفتوحًا أم مُغلقًا، من خلالِ مقارنةِ فرقِ الترددِ بينَ التوافقيّاتِ المتجاورةِ والترددِ الأساسيِّ؟ أوضحْ ذلك.

27. يشبهُ البوقُ أنبوبًا مفتوحَ الطرفَيْن، بينما يشبهُ المزمارُ أنبوبًا مغلقَ الطرفِ الواحدِ. لماذا يكونُ الترددُ الأساسيُّ للبوقِ حوالي ضعفِ الترددِ الأساسيِّ للمزمارِ، علمًا أن لهما الطولَ نفسَه تقريبًا؟

28. الترددُ الأساسيُّ لأيِّ نغمةٍ تصدرُ عن البوقِ تتغيَّرُ قليلاً بتغيُّراتِ درجةِ حرارةِ الهواءِ. هل الارتفاعُ في درجةِ الحرارة، حيالَ نغمةٍ معيَّنةٍ، يُصدرُ ترددًا أساسيًّا أعلى قليلاً أم أدنى قليلاً؟

مسائلُ تطبيقية

29. ما ترددُ التوافقيّاتِ الثلاثِ الأولى لنغمةٍ أُحدثَتْ على وترٍ طولُه 31.0 cm، إذا كانَت سرعةُ الموجاتِ على هذا الوترِ 274.4 m/s؟

30. يبلغُ طولُ قناةِ الأذنِ البشريَّةِ حوالي 2.8 cm، ويمكنُ اعتبارُها أنبوبًا مفتوحَ الطرفِ الواحدِ، ومغلقًا عندَ طبلةِ الأذنِ. حولَ أيِّ ترددٍ تتوقَّعُ أن يكونَ السمعُ هو الأفضلُ، إذا كانَت سرعةُ الصوتِ في الهواءِ 340 m/s؟ (ملاحظة: جدِ الترددَ الأساسيَّ لقناةِ الأذنِ).

مراجعة عامّة

31. لأنبوبٍ مفتوحِ الطرفَيْن ترددٌ أساسيٌّ يساوي 320 Hz عندَما تكونُ سرعةُ الصوتِ في الهواءِ 331 m/s.

أ. ما طولُ الأنبوبِ؟

ب. ما التوافقيّتان التاليتان؟

32. يتراوحُ مدى السمعِ البشريِّ بين 20 Hz و 20 000 Hz تقريبًا. جدِ الطولَين الموجيَّين لهذَين الترددَين إذا كانَت سرعةُ الصوتِ في الهواءِ 343 m/s؟

33. يسبحُ دلفينٌ في مياهِ بحرٍ درجةُ حرارتِها 25°C، فيُصدرُ صوتًا في اتجاهِ القاعِ على عمقِ 150 m، كم يمرُّ من الوقتِ حتى يُسمعَ الصدى؟ (انظرْ سرعةَ الصوتِ في **الجدول** 4-1).

34. أنبوبٌ مفتوحُ الطرفينِ طولُه 2.46 m، وسرعةُ الصوتِ في الهواءِ داخلَ الأنبوبِ 345 m/s.

أ. ما الترددُ الأساسيُّ لهذا الأنبوبِ؟

ب. ما عددُ التوافقيّاتِ المحتملةِ بين الترددين (20 Hz→20 KHz) في المدى المسموعِ؟

35. أنبوبٌ مفتوحُ الطرفين، يقابلُ تردُّدهُ الأساسيُّ النغمةَ المتوسِّطةَ C ($f = 261.6$ Hz). وأنبوبٌ آخرُ مغلقُ الطرفِ الواحدِ يصدرُ توافقيَّةً ثالثةً بالتردُّدِ الأساسيِّ للأنبوبِ الأوّل. قارنْ بين طولَي الأنبوبَيْن.

36. تسير سيارة «فورميولا وان formula one» بعيدًا عن مراقب فيسمعُ تردُّد صوت محرِّكها أقلّ بـ 20% من تردُّده إذا كانت السيارة متوقِّفة. ما سرعة السيارة؟

37. يطير خفّاش باتجاه حائط ثابت فيصدرُ موجة فوق صوتية تردُّدها 80 kHz ويسمع الموجة المنعكسة من الحائط بتردُّد 90 kHz.
أ. أعطِ معادلة التردُّد الظاهري للموجة عند اصطدامها بالحائط.
ب. ما مصدرُ الموجاتِ في طريقِ العودةِ باتجاهِ الخفّاش؟
ج. احسبْ سرعة الخفّاش.
(استعمل سرعة الصوت في الهواء 340 m/s.)

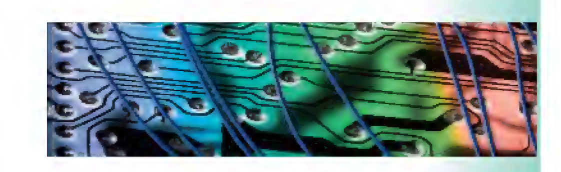
التقارير والمشاريع

1. تمَّ بناءُ مطارٍ يبعدُ مسافةَ 750 m عن مدرستِك. يبلغُ مستوى شدَّةِ ضجيجِ الطائرةِ التي تحطُّ، على مسافةِ 50 m منها، 130 dB. في الأماكنِ المفتوحةِ كالحقولِ التي تفصلُ بينَ المدرسةِ والمطارِ، ينخفضُ المستوى 20 dB كلما ازدادَتِ المسافة عشرةَ أمثالٍ. قمْ بالانضمامِ إلى فريقٍ متعاونٍ للقيامِ ببحثٍ حولَ الخياراتِ التي من شأنِها الحفاظُ على مستوى محتملٍ من الضجيجِ في المدرسةِ. إلى أيِّ مسافةٍ يجبُ إبعادُ المدرسةِ ليصبحَ الصوتُ مقبولاً؟ ناقشْ أسعارَ الأراضي قربَ مدرستِك. ما الخياراتُ المتوفِّرةُ لعزلِ الصوتِ في مبنى المدرسةِ؟ كم هي مكلفةٌ تلك الخياراتُ؟ دعْ كلَّ مشاركٍ في المجموعةِ يقدِّمْ إيجابياتِ تلك الخياراتِ وسلبيّاتِها.

2. استعملْ قناني المياهِ لصنعِ آلةِ أنابيبَ هوائيَّةٍ. عدِّلْ كمّيَّةَ المياهِ في القناني المختلفةِ لإصدارِ نغماتٍ موسيقيَّةٍ. استعملْها كآلاتِ طَرْقٍ أو نفخٍ. ما الوسطُ المهتزُّ في كلِّ حالةٍ؟ ما الذي يؤثِّرُ في التردُّدِ الأساسيِّ؟ استعملِ الميكروفونَ والأسيلسكوبَ (مرسمةَ التذبذبات) لتحليلِ أدائك.

3. أجرِ مقابلاتٍ مع أطبّاءٍ لتتعلَّمَ عن السمعِ. اذكُرْ بعضَ أنواعِ الأجهزةِ السمعيَّةِ المساعدةِ، وأوضحْ علاقتَها بالمرضِ والعمرِ والمهنةِ وأخطارِ البيئةِ. ما الطرائقُ والآلاتُ المستعملةُ لفحصِ السمعِ؟ كيف تعملُ آلاتُ السمعِ المُساعِدةُ؟ ما حدودُ إمكانيّاتِ آلاتِ السمعِ المُساعِدةِ؟ قدِّم نتائجَك إلى زملائِك في الصفِّ.

4. قمْ ببحثٍ حولَ الصوتيّاتِ المعماريَّةِ الخاصّةِ بمطعم. ما بعضُ المشكلاتِ الصوتيَّةِ في أماكنَ يتجمَّعُ فيها الناسُ؟ ما تأثيرُ الأسقُفِ الغريبةِ الشكلِ والألواحِ الزخرفيَّةِ والستائرِ والنوافذِ الزجاجيَّةِ في الصدى والضجيجِ؟ جِدِ الأطوالَ الموجيَّةَ الأقصرَ للأصواتِ التي يجبُ امتصاصُها، معتبرًا أن أصواتَ المحادثةِ يتراوحُ تردُّدُها بين 500 Hz و 5000 Hz. حضِّرْ مخطَّطًا أو نموذجًا لكافيتريا مدرستِك، وضمِّنْه توضيحًا حولَ المقارباتِ التي تستخدمُها لتحافظَ على المستوى الأدنى للضجيجِ.



تقويم الفصل 4

اختيارٌ من متعدِّد

1. عندما يعبرُ جزءٌ من موجةٍ صوتيَّةٍ من الهواءِ إلى الماءِ، فأيُّ خاصّيَّةٍ للموجةِ تبقى نفسَها؟

أ. السرعة.

ب. التردُّد.

ج. الطولُ الموجيُّ.

د. السعة.

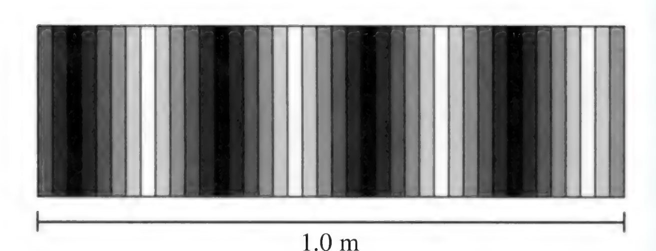
2. ما الطولُ الموجيُّ للموجةِ الصوتيَّةِ الظاهرةِ في الشكلِ التالي؟

أ. 1.00 m

ب. 0.75 m

ج. 0.50 m

د. 0.25 m



3. إذا تبيَّنَ أن الصوتَ يرتفعُ، فأيُّ مما يلي يُحتملُ أنه يزدادُ؟

أ. سرعةُ الصوتِ.

ب. التردُّد.

ج. الطولُ الموجيُّ.

د. الشدَّة.

4. تزدادُ شدَّةُ صوتٍ معيَّنٍ بمقدارِ 1000 مرة، ما الزيادةُ في مستوى شدَّةِ الصوتِ بوحدةِ الديسيبل؟

أ. 10

ب. 20

ج. 30

د. 40

5. في أيٍّ ممّا يلي لا يحدثُ تأثيرُ دوبلر؟

أ. مصدرُ الصوتِ يتحرَّكُ في اتِّجاهِ المراقبِ.

ب. المراقبُ يتحرَّكُ في اتِّجاهِ مصدرِ الصوتِ.

ج. المراقبُ والمصدرُ ساكنان أحدُهما بالنسبةِ إلى الآخرِ.

د. المراقبُ والمصدرُ يتقاربان أو يتباعدان.

6. إذا تضاعفَتِ المسافةُ عن المصدرِ ثلاثةَ أمثالٍ، فبأيِّ عاملٍ تتغيَّرُ شدَّةُ الصوتِ؟

أ. $\frac{1}{9}$

ب. $\frac{1}{3}$

ج. 3

د. 9

7. كيف يستطيعُ كلبٌ سماعَ الصوتِ الذي تصدرُه صافرةُ الكلبِ، ولا يستطيعُ صاحبُه ذلك؟

أ. تلتقطُ الكلابُ أصواتًا ذاتَ شدَّةٍ أقلَّ من الأصواتِ التي يلتقطُها البشرُ.

ب. تلتقطُ الكلابُ أصواتًا ذاتَ تردُّدٍ أعلى من الأصواتِ التي يلتقطُها البشرُ.

ج. تلتقطُ الكلابُ أصواتًا ذاتَ تردُّدٍ أدنى من الأصواتِ التي يلتقطُها البشرُ.

د. تلتقطُ الكلابُ أصواتًا ذاتَ سرعةٍ أعلى من الأصواتِ التي يلتقطُها البشرُ.

8. أعلى قيمةٍ تحقَّقَتْ لسرعةِ الصوتِ في الهواءِ تبلغُ حوالي 1.0×10^4 m/s، وأعلى تردُّدٍ يبلغُ حوالي 2.0×10^{10} Hz، ما الطولُ الموجيُّ لموجةٍ صوتيَّةٍ واحدةٍ بالسرعةِ والتردُّدِ السابقَين؟

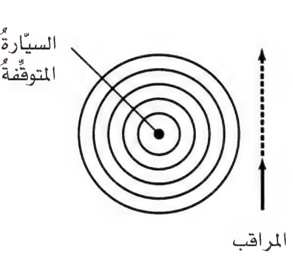
أ. 5.0×10^{-6} m

ب. 5.0×10^{-7} m

ج. 2.0×10^{6} m

د. 2.0×10^{14} m

9. تركبُ حافلةٌ تمرُّ بالقربِ من سيارةٍ متوقِّفةٍ، وقد أطلقَ سائقُ السيارةِ المتوقِّفةِ صوتَ المنبِّهِ، كما يظهرُ في الشكلِ أدناه. ما طبيعةُ الصوتِ الذي تسمعُه؟
أ. الصوتُ الأصليُّ للمنبِّهِ بدرجةٍ ترتفعُ.
ب. الصوتُ الأصليُّ للمنبِّهِ بدرجةٍ تنخفضُ.
ج. صوتٌ يرتفعُ من درجةٍ منخفضةٍ إلى درجةٍ أعلى.
د. صوتٌ ينخفضُ من درجةٍ مرتفعةٍ إلى درجةٍ أقلَّ.

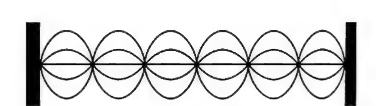


10. للتوافقيَّةِ الثانيةِ لوترِ آلةٍ تردُّدٌ قيمتُه 165 Hz، إذا كانَت سرعةُ الموجاتِ على الوترِ 120 m/s، فما طولُ الوترِ؟
أ. 0.36 m
ب. 0.73 m
ج. 1.1 m
د. 1.4 m

أسئلةٌ ذاتُ إجابةٍ قصيرة

11. إذا نفخْتَ على عرضِ فوَّهةِ قنّينةٍ فأحدثْتَ نغمةً بتردُّدٍ 250 Hz، فما تردُّدُ التوافقيَّةِ التاليةِ المسموعةِ إذا نفخْتَ بقوَّةٍ أكبرَ؟

12. يُظهرُ الشكلُ التالي وترًا مهتزًّا في التوافقيَّةِ السادسةِ، ما الطولُ الموجيُّ إذا كانَ طولُ الوترِ 1.0 m؟



13. القدرةُ الصادرةُ عن مكبِّرِ صوتٍ 250.0 W، ما شدَّةُ الصوتِ الذي يسمعُه شخصٌ يجلسُ بعيدًا عن المكبِّرِ مسافةَ 6.5 m؟

أسئلةٌ ذاتُ إجابةٍ مطوَّلة

استعمل المعلومةَ التاليةَ لحلِّ المسألتَيْنِ 14-15 مع إظهارِ طريقةِ الحلِّ.

لطبلةِ الأذنِ مساحةٌ تساوي تقريبًا 5.0×10^{-5} m^2.

14. ما قدرةُ الصوتِ الساقطِ على طبلةِ الأذنِ، عندَ عتبةِ الألمِ (1.0 W/m^2)؟

15. ما قدرةُ الصوتِ الساقطِ على طبلةِ الأذنِ عندَ عتبةِ السمعِ (1.0×10^{-12} W/m^2)؟

استعمل المعلوماتِ التاليةَ لحلِّ المسائلِ 16-18 مع إظهارِ طريقةِ الحلِّ.

لأنبوبٍ مفتوحِ الطرفَينِ تردُّدٌ أساسيٌّ يساوي 456 Hz، عندَما تكونُ سرعةُ الصوتِ في الهواءِ 331 m/s.

16. ما طولُ الأنبوبِ؟

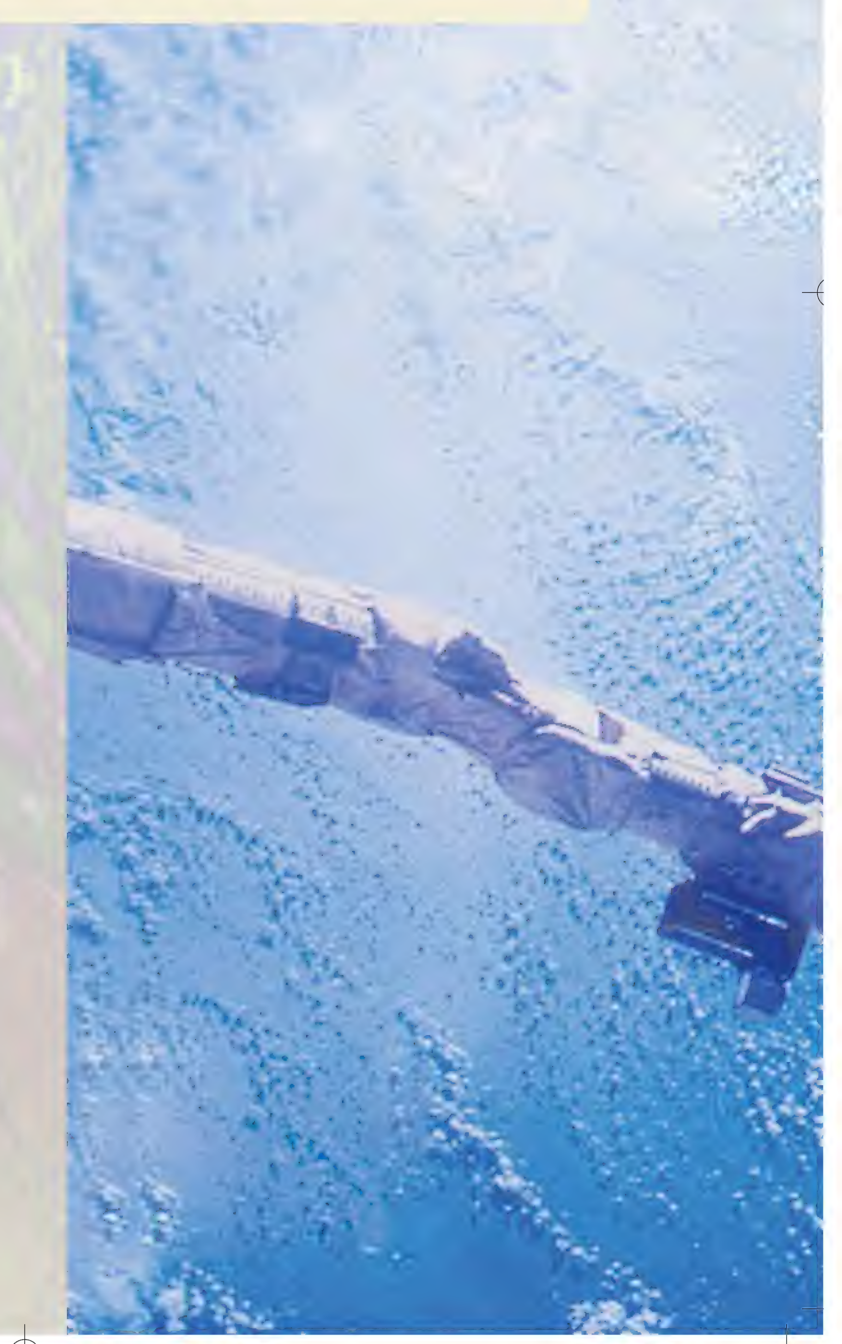
17. ما تردُّدُ التوافقيَّةِ الثانيةِ للأنبوبِ؟

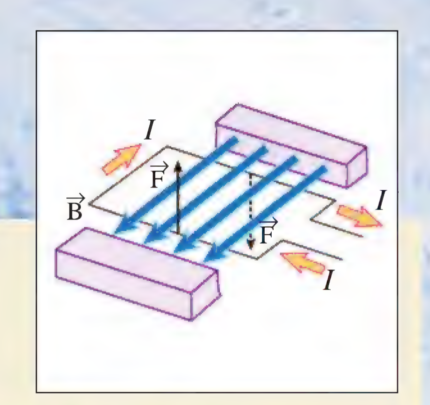
18. ما التردُّدُ الأساسيُّ لهذا الأنبوبِ إذا ارتفعَتْ سرعةُ الصوتِ في الهواءِ إلى 367 m/s نتيجةَ الارتفاعِ في درجةِ حرارةِ الهواءِ؟



الفصـــــــل 5

المغناطيسيَّةُ
Magnetism





تشتملُ الأقمارُ الاصطناعيَّةُ على أسلاك ملفوفة تسمّى ملفاتِ العزمِ المغناطيسيِّ، يمكن التحكّم فيها من سطح الأرض بواسطة مشغلين مختصين. عند مرور التيّار الكهربائيّ في ملفّ العزم، فإنه يتأثر بعزم من المجال المغناطيسيّ للأرض. ملفّات العزوم تستخدم لتوجيه الأقمار الصناعية في الاتجاه الذي يرغب لأجهزتنا أن تعمل فيه.

ما يُتوقَّعُ تحقيقُهُ

في هذا الفصلِ، تتعلَّمُ أن الملفَّ الناقلَ للتيّارِ يتصرَّفُ كمغناطيس. تدرسُ أيضًا القوى التي تؤثِّرُ في الجُسيماتِ المشحونةِ التي تتحرَّكُ في منطقةِ مجالٍ مغناطيسيٍّ.

ما أهمّيّتُه

تُستعملُ المغانطُ الدائمةُ والمغانطُ الكهربائيَّةُ في الكثيرِ من التطبيقاتِ اليوميَّةِ والعلميَّةِ. وتستعملُ المغانطُ الكهربائيَّةُ الضخمةُ لالتقاطِ ونقلِ الأحمالِ الثقيلةِ، كقطعِ الحديدِ القديمةِ (scrap iron) في محطةِ تدويرٍ (recycling plant) لإعادةِ تصنيعِ الأجهزةِ.

محتوى الفصل 5



المجالاتُ المغناطيسيَّةُ
Magnetic Fields

1-5 أهداف القسم

- يصفُ المجالَ المغناطيسيَّ حولَ المغناطيسِ الدائمِ.
- يحسبُ التدفُّقَ المغناطيسيَّ الذي يجتازُ سطحًا.

المجالُ المغناطيسيُّ

منطقةٌ يمكنُ قياسُ قوَّةٍ مغناطيسيَّةٍ فيها.

المجالُ والتدفُّقُ المغناطيسيَّان

تعرفُ أن من الممكنِ وصفَ التفاعلاتِ بينَ الأجسامِ المشحونةِ، باستعمالِ مفهومِ المجالِ الكهربائيِّ. كذلك يمكنُ استعمالُ طريقةٍ مشابهةٍ لوصفِ **المجالِ المغناطيسيِّ** magnetic field الذي يحيطُ بأيِّ مادّةٍ مغناطيسيَّةٍ. وكما في حالةِ المجالِ الكهربائيِّ، فإن المجالَ المغناطيسيَّ $\vec{B}$ كمّيّةٌ اتجاهيةٌ لها مقدارٌ واتِّجاهٌ.

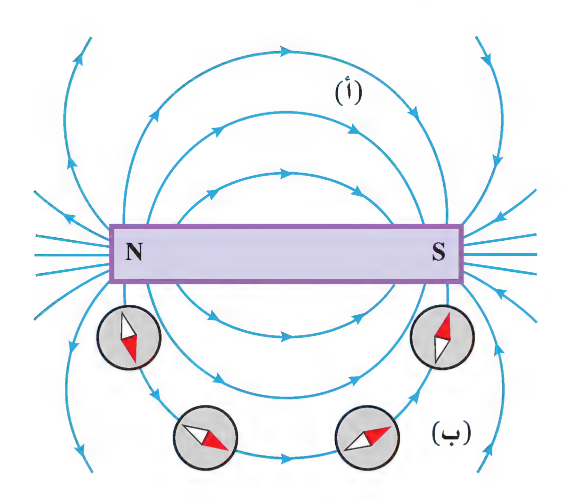
تعلَّمْتَ سابقًا أن لكلِّ مغناطيسٍ قطبَيْنِ أحدُهما شماليٌّ والآخرُ جنوبيٌّ، وتعرفُ أيضًا أن الأقطابَ المتشابهةَ تتنافرُ في حين أنَّ الأقطابَ المختلفةَ تتجاذبُ. كما أن المغانطَ تستطيعُ مغنطةَ موادَّ أخرى تُسمّى موادَّ مغناطيسيَّةً ويتناسب مقدارها مع عدد خطوط المجال المغناطيسي التي تجتاز عموديًّا وحدة المساحة.

رسمُ خطوطِ المجالِ المغناطيسيِّ باستعمالِ البوصلةِ

يمكنُ استكشافُ المجالِ المغناطيسيِّ لقضيبٍ مغناطيسيٍّ، كما هو موضَّحٌ في **الشكل 1-5**. إذا وُضعَتْ إبرةُ بوصلةٍ صغيرةٍ قابلةٌ للتحرُّكِ قربَ مجالٍ مغناطيسيٍّ، فسوفَ تصطفُّ في مواضعِها المتعاقبةِ في اتِّجاهِ خطوطِ المجالِ. يُعرَّفُ اتِّجاهُ المجالِ المغناطيسيِّ $\vec{B}$ عندَ نقطةٍ معيَّنةٍ، بأنه اتِّجاهُ القطبِ الشماليِّ لبوصلةٍ تدلُّ على ذلك الاتِّجاهِ.

تبدو خطوطُ المجالِ المغناطيسيِّ، وكأنَّها تنطلقُ من القطبِ الشماليِّ وتنتهي عند القطبِ الجنوبيِّ لمغناطيس. لكن ليسَ لخطوطِ المجالِ المغناطيسيِّ بدايةٌ ولا نهايةٌ، بل هي تشكِّلُ دائمًا مساراتٍ مغلقةً. في المغناطيسِ الدائمِ، تتابعُ خطوطُ المجالِ سيرَها داخلَ المغناطيسِ، مكوِّنةً بذلك مساراتٍ مغلقةً. (هذا الجزءُ من الخطوطِ لا يظهرُ في الرسمِ.)

سوف نعتمدُ في هذا الكتابِ قاعدةً بسيطةً لتحديدِ اتِّجاهِ المجالِ المغناطيسيِّ $\vec{B}$: نستعملُ سهمًا للدلالةِ على اتِّجاهِ المجالِ المغناطيسيِّ في مستوى الصفحةِ، كما هو موضَّحٌ

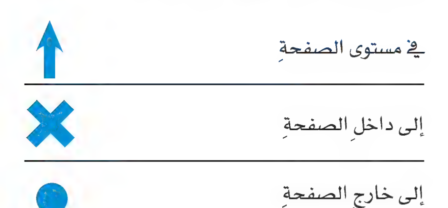


الشكل 1-5
يمكنُ تحديدُ اتِّجاهِ المجالِ المغناطيسيِّ (أ) بوساطةِ بوصلةٍ (ب). لاحظْ أن القطبَ الشماليَّ للبوصلةِ يدلُّ على اتِّجاهِ خطوطِ المجالِ المنطلقةِ من القطبِ الشماليِّ إلى القطبِ الجنوبيِّ.

في **الجدول 5-1**. ونستعملُ إشارةَ **X** بلونٍ أزرقَ، وهي تعبِّرُ عن ذيلِ السهمِ، للدلالةِ على المجالِ الموجَّهِ إلى داخلِ الصفحةِ. ونستعملُ إشارةَ ● بلونٍ أزرقَ وهي تعبِّرُ عن رأسِ السهمِ للدلالةِ على المجالِ الموجَّهِ إلى خارجِ الصفحةِ.

الجدول 5-1

تمثيلُ اتِّجاهِ المجالِ المغناطيسيِّ



علاقةُ التدفُّقِ المغناطيسيِّ بشدَّةِ المجالِ المغناطيسيِّ

إحدى الطرائقِ المفيدةِ لنمذجةِ شدَّةِ المجالِ المغناطيسيِّ، هي تعريفُ كمّيَّةٍ تسمّى *التدفُّقَ المغناطيسيَّ*، ($\Phi_{\text{المغناطيسي}}$). يُعرَّفُ التدفُّقُ بأنه عددُ خطوطِ المجالِ التي تخترقُ مساحةً معيَّنةً بشكلٍ عموديٍّ عليها. يمكنُ حسابُ التدفُّقِ المغناطيسيِّ بالمعادلةِ التاليةِ:

التدفُّقُ المغناطيسيُّ

$$\Phi_{\text{المغناطيسي}} = \vec{A} \cdot \vec{B}$$

حيث $\vec{A}$ **متَّجهُ المساحةِ** area vector، و $\vec{B}$ متَّجهُ المجالِ المغناطيسيِّ

$$\Phi_{\text{المغناطيسي}} = A(B\cos\theta)$$

(θ) هي الزاوية المحصورة بين اتّجاه المجال والعمود على السطح.

التدفُّقُ المغناطيسيُّ = (مساحةَ السطحِ) × (مركَّبةِ المجالِ المغناطيسيِّ العموديةِ على مُستوى السطحِ)

مُتَّجه المساحة

مُتَّجهٌ مقدارُه المساحةُ المذكورةُ، واتِّجاهُهُ هو الاتِّجاهُ العموديُّ لتلك لمساحة.

يقاس التدفُّق المغناطيسي في النظام الدولي للوحدات بوحدة ويبر (weber) ويرمز إليها بالرمز (wb).

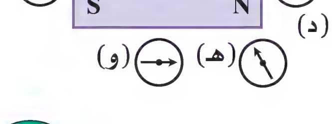
لنلقِ نظرةً أخرى على **الشكل 5-1**. تخيَّلْ دائرتَيْنِ متساويتَي المساحةِ وعموديتَيْنِ على محورِ المغناطيسِ. إحدى هاتَيْنِ الدائرتَيْنِ توضعُ بالقربِ من قطبِ المغناطيسِ، وتوضعُ الثانيةُ إلى جانبِ المغناطيسِ. إن عددًا أكبرَ من خطوطِ المجالِ يخترقُ الدائرةَ الأولى القريبةَ من قطبِ المغناطيسِ. يشيرُ هذا التدفُّقُ المغناطيسيُّ الكبيرُ إلى أن شدَّةَ المجالِ المغناطيسيِّ تكونُ أكبرَ قربَ قُطبِ المغناطيسِ.

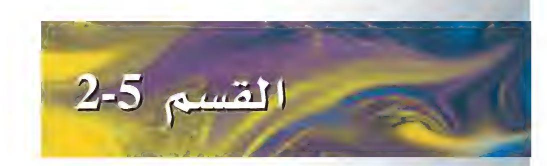
التخلُّف المغناطيسي

عندما تتعرَّض مادَّة فيرومغناطيسية (ساق من الحديد) لمجال مغناطيسي فإنها تتمغنط وتزداد كثافة الفيض بطريقة غير خطِّية كلَّما زاد المجال. وعند إزالة المجال المغناطيسي، فإنها تستبقي بعض المغناطيسية التي اكتسبتها، وتسمّى هذه الظاهرة *التخلُّف المغناطيسي* أو *الهسترة المغناطيسية* *magnetic hysteresis*، ويسمّى المنحنى الناتج من تغير شدة المجال وكثافة الفيض بمنحنى التخلُّف المغناطيسي.

مراجعةُ القسمِ 5-1

1. عندَما تكسرُ قضيبًا مغناطيسيًّا إلى قسمَيْنِ، كم قطبًا يكونُ لكلِّ قسمٍ؟
2. **تفسيرُ الرسومِ:** أيٌّ من اتِّجاهاتِ إبرةِ البوصلةِ، في الشكلِ المجاورِ، يصفُ بصورةٍ صحيحةٍ اتِّجاهَ المجالِ المغناطيسيِّ، عندَ النقطةِ المذكورةِ؟





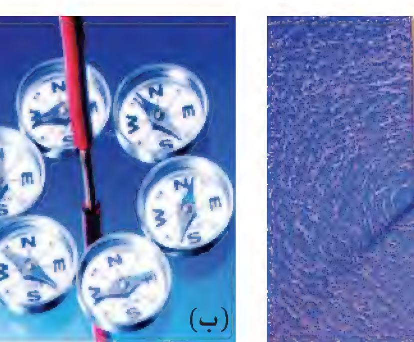
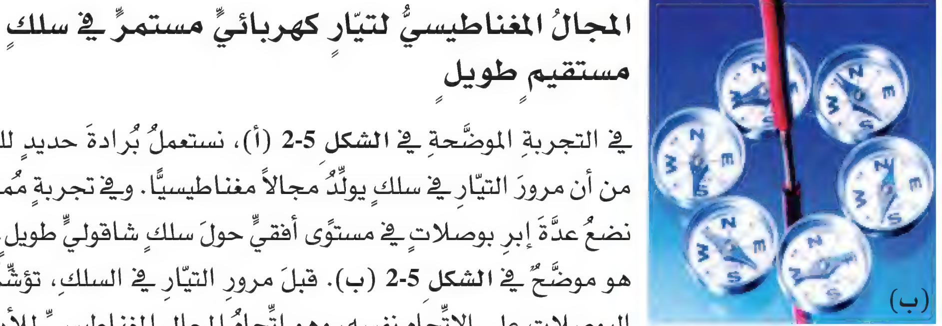
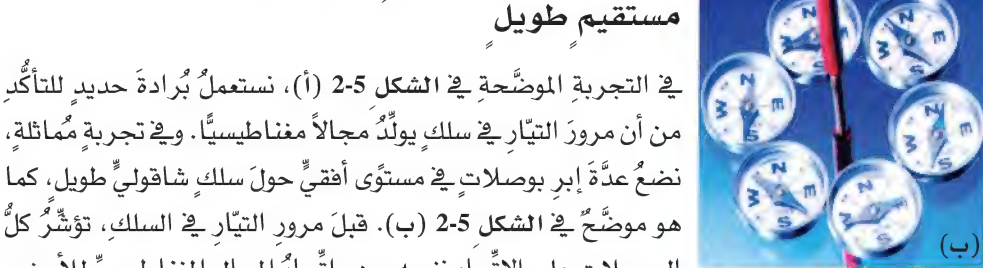
المغناطيسيّةُ الناتجةُ عن الكهرباءِ
Magnetism from Electricity

5-2 أهداف القسم

- يصفُ المجالَ المغناطيسيَّ الناتجَ عن تيّارٍ مستمرٍّ يمرُّ في موصِّلٍ مستقيمٍ، وفي ملفٍّ.
- يستعملُ قاعدةَ اليدِ اليُمنى ليحدِّدَ اتّجاهَ المجالِ المغناطيسيِّ، في سلكٍ ناقلٍ للتيّارِ المستمرِّ.
- يحلُّ مسائلَ لحسابِ المجالِ المغناطيسيِّ الناتجِ عن تيّارٍ مستمرٍّ يمرُّ في موصِّلٍ مستقيمٍ وفي ملفٍّ.

المجالُ المغناطيسيُّ الناتجُ عن سلكٍ ناقلٍ للتيّارِ المستمرِّ

اعتقدَ العلماءُ في أواخرِ القرنِ الثامنَ عشرَ بأنَّ هناكَ علاقةً بينَ الكهربائيَّةِ والمغناطيسيَّةِ. لكن لم تتوفَّرْ آنذاك أيُّ نظريَّةٍ ترشدُهم إلى تجاربَ في هذا الإطارِ. في العامِ 1820، ابتكرَ الفيزيائيُّ أورستد طريقةً لدراسةِ هذه العلاقةِ. فقد لاحظَ الآتي: عندَ اقترابِ بوصلةٍ من سلكٍ يحملُ تيّارًا كهربائيًّا، فإنها تنحرفُ عن اتِّجاهِها الشماليِّ-الجنوبيِّ المعتادِ. نشرَ أورستدُ اكتشافَه في يوليو 1820. وحفَّزَ عملُه هذا علماءَ آخرين في أوروبا، للتأكُّدِ من نتائجِ تجربتِه.

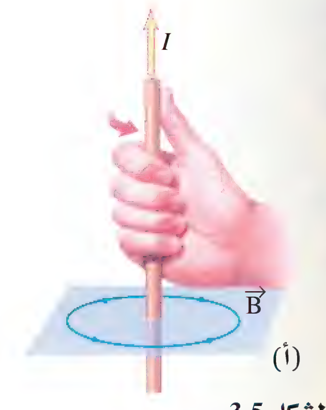
الشكل 5-2

(أ) عندَ مرورِ تيّارٍ قويٍ في السلكِ، يدلُّ اصطفافُ بُرادةِ الحديدِ على أن المجالَ المغناطيسيَّ المُحتثَّ بوساطةِ التيّارِ، يشكِّلُ دوائرَ متّحدةَ المركزِ حولَ السلكِ. (ب) يمكنُ استعمالُ البوصلاتِ لتحديدِ اتّجاهِ المجالِ المغناطيسيِّ المُحتثِّ بوساطةِ التيّارِ.

المجالُ المغناطيسيُّ لتيّارٍ كهربائيٍّ مستمرٍّ في سلكٍ مستقيمٍ طويلٍ

في التجربةِ الموضَّحةِ في **الشكل 5-2** (أ)، نستعملُ بُرادةَ حديدٍ للتأكُّدِ من أن مرورَ التيّارِ في سلكٍ يولِّدُ مجالاً مغناطيسيًّا. وفي تجربةٍ مُماثلةٍ، نضعُ عدَّةَ إبرِ بوصلاتٍ في مستوًى أفقيٍّ حولَ سلكٍ شاقوليٍّ طويلٍ، كما هو موضَّحٌ في **الشكل 5-2** (ب). قبلَ مرورِ التيّارِ في السلكِ، تؤشِّرُ كلُّ البوصلاتِ على الاتّجاهِ نفسِه، وهو اتّجاهُ المجالِ المغناطيسيِّ للأرضِ. لكن، عندَ مرورِ تيّارٍ قويٍّ في السلكِ، فإنَّ كلَّ بوصلةٍ تتَّخذُ الاتّجاهَ المماسّيَّ للدوائرِ المتَّحدةِ المركزِ حولَ السلكِ. يدلُّ ذلك على اتّجاهِ المجالِ المغناطيسيِّ المُحتَثِّ بوساطةِ التيّارِ. عندَ إزالةِ التيّارِ مرَّةً أخرى، تعودُ البوصلاتُ إلى اتّجاهِها الأساسيِّ.

استخدامُ قاعدةِ اليدِ اليُمنى لتحديدِ اتّجاهِ المجالِ المغناطيسيِّ



الشكل 5-3

(أ) يمكنُكَ استعمالُ قاعدةِ اليدِ اليُمني، لإيجادِ اتّجاهِ المجالِ المغناطيسي.

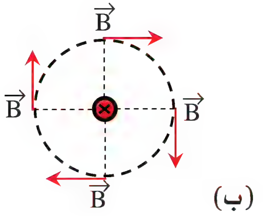
التجاربُ السابقةُ توضّح إنه يمكن تحديد اتّجاه المجال المغناطيسي حول موصل مستقيم الذي يمر فيه تيّار باستخدام قاعدة بسيطة للتيّار الاصطلاحي، تُسمّى قاعدةَ اليدِ اليُمنى، وهي التاليةُ: إذا قُبِضَ السلكُ باليدِ اليُمنى، بحيثُ يكونُ اتّجاهُ الإبهامِ مع اتّجاهِ التيّارِ الكهربائيِّ، كما في **الشكل 5-3** (أ)، فإنَّ التفافَ الأصابعِ الأربعِ يكونُ باتّجاهِ المجالِ المغناطيسيِّ $\vec{B}$.

يوضّحُ **الشكلُ 5-2** (أ) أن خطوطَ المجالِ $\vec{B}$ هي دوائرُ متّحدةُ المركزِ حولَ السلكِ. بالتماثلِ، فإن مقدارَ $\vec{B}$ هو نفسُه عندَ أيِّ نقطةٍ على دائرةٍ مركزُها السلكُ، وتقعُ في مستوًى عموديٍّ عليه. تُظهرُ التجاربُ أن مقدارَ $\vec{B}$ يتناسبُ طرديًّا مع شدَّةِ التيّارِ المارِّ في السلكِ، وعكسيًّا مع المسافةِ العموديَّةِ على السلكِ. وتحسبُ B عندَ نقطةٍ بالقربِ من

سلكٍ من العلاقةِ التاليةِ:

$$B = \frac{\mu}{2\pi}\frac{I}{d}$$

حيثُ μ معاملُ النفاذيَّةِ المغناطيسيَّةِ للوسطِ، و μ_o معاملُ النفاذيَّةِ المغناطيسيَّةِ للفراغِ أو الهواءِ، و d بعدُ النقطةِ عن السلكِ. علمًا بأن $\mu_o = 4\pi \times 10^{-7}$ T•m/A و T (تسلا) هي وحدةُ قياسِ شدَّةِ المجالِ المغناطيسيِّ B. ويحدِّدُ اتِّجاهُ $\vec{B}$ عندَ أيِّ نقطةٍ باتِّجاهِ المماسِّ لخطِّ المجالِ عند تلك النقطةِ كما في الشكل 3-5 (ب).



الشكل 3-5

(ب) المماس لخط المجال عند أي نقطة يحدّد اتجاه المجال عند تلك النقطة.

مثال 5 (أ)

المجالُ المغناطيسيُّ الناتجُ عن سلكٍ ناقلٍ للتيّارِ المستمرِّ

المسألة

احسبْ مقدارَ المجالِ المغناطيسيِّ عندَ نقطةٍ في الهواءِ على بُعد 0.10 m من سلكٍ مستقيمٍ طويلٍ يمرُّ به تيّارٌ مستمرٌّ شدَّتُه 10.0 A علمًا بأنَّ: $\mu_o = 4\pi \times 10^{-7}$ T•m/A.

الحـــلّ

1. أعرِّف

المعطى: $d = 0.10$ m $I = 10.0$ A $\mu_o = 4\pi \times 10^{-7}$ T.m/A

المجهول: $B = ?$

2. أخطِّط

أختارُ معادلةً أو موقفًا: أستعملُ العلاقةَ $B = \frac{\mu}{2\pi}\frac{I}{d}$

3. أحسب

أعوِّضُ القيمَ في المعادلاتِ وأحلُّ:

$$B = \frac{\mu_o I}{2\pi d} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 10.0}{2\pi \times 0.10} = \boxed{2.0 \times 10^{-5}\ \text{T}}$$

تطبيق 5 (أ)

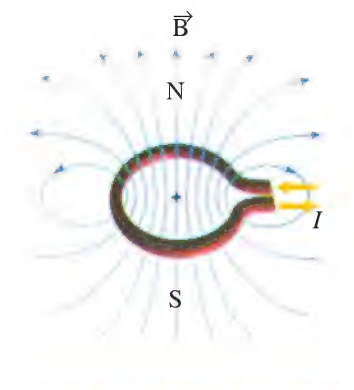
المجالُ المغناطيسيُّ الناتجُ عن سلكٍ ناقلٍ للتيّارِ المستمرِّ

استعمل $\mu_o = 4\pi \times 10^{-7}$ T•m/A

1. وُضعَ سلكٌ مستقيمٌ على امتدادِ محورِ x. احسبْ مقدارَ المجالِ المغناطيسيِّ الناتجِ عندَ نقطةِ M (10.0 cm) على محورِ y^+ الموجبِ، وذلك عندَ مرورِ تيّارٍ 10 A في السلكِ:
   أ. في اتِّجاهِ x الموجبِ.
   ب. في اتِّجاهِ x السالبِ.
2. تبلغُ شدَّةُ المجالِ المغناطيسيِّ على مسافةِ 10 cm من سلكٍ مستقيمٍ 2×10^{-5} T. احسبْ شدَّةَ التيّارِ الكهربائيِّ المارِّ في السلكِ.

المجالُ المغناطيسيُّ لملفّاتِ التيّار الكهربائي

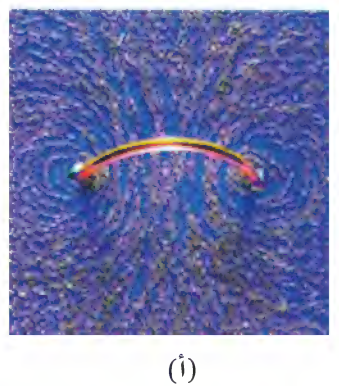
المجالُ المغناطيسيُّ لتيّارٍ مستمرٍّ يمرُّ في ملفٍّ دائريٍّ



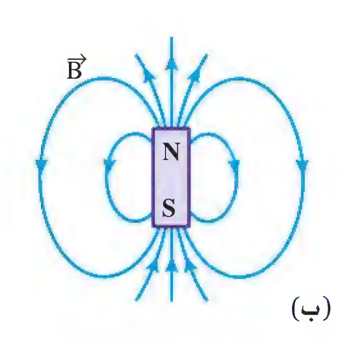
يمكنُ استعمالُ قاعدةِ اليدِ اليُمنى، أيضًا، لمعرفةِ اتِّجاهِ المجالِ المغناطيسيِّ لحلقةٍ تنقلُ تيّارًا، كالحلقةِ الموضَّحةِ في **الشكل 4-5** (أ). بغضِّ النظرِ عن النقطةِ التي تُطبَّقُ فيها قاعدةُ اليدِ اليُمنى على الحلقةِ، فإنَ اتِّجاهَ المجالِ داخلَ الحلقةِ يكونُ إلى أعلى. لاحظْ أن خطوطَ مجالِ الحلقةِ الناقلةِ للتيّارِ تشبهُ الخطوطَ الخاصّةَ بالقضيبِ المغناطيسيِّ، كما يوضِّحُ **الشكلُ 4-5** (ب).

ويحسَبُ مقدارُ المجالِ المغناطيسيِّ عندَ مركزِ الملفِّ الدائريِّ الذي نصفُ قطرِه r وشدَّةُ التيّارِ الذي يحملُه I وعددُ لفّاتِه N، من العلاقةِ:

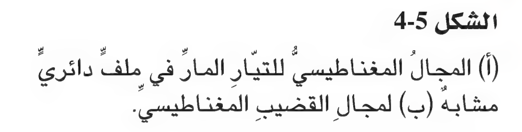
$$B = \frac{\mu_o NI}{2r}$$



(أ)



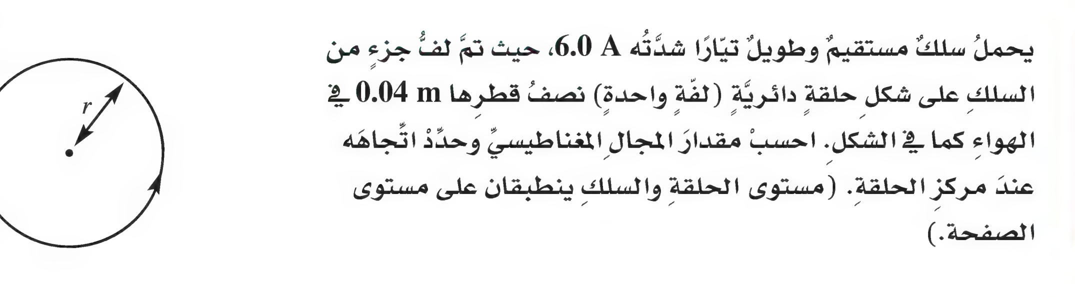
(ب)


الشكل 4-5
(أ) المجالُ المغناطيسيُّ للتيّارِ المارِّ في ملفٍّ دائريٍّ مشابهٌ (ب) لمجالِ القضيبِ المغناطيسي.

مثال 5 (ب)

المجالُ المغناطيسيُّ لتيّارٍ مستمرٍّ في ملفٍّ دائريٍّ

المسألة



يحملُ سلكٌ مستقيمٌ وطويلٌ تيّارًا شدَّتُه 6.0 A، حيث تمَّ لفُّ جزءٍ من السلكِ على شكلِ حلقةٍ دائريَّةٍ (لفّةٍ واحدةٍ) نصفُ قطرِها 0.04 m في الهواءِ كما في الشكلِ. احسبْ مقدارَ المجالِ المغناطيسيِّ وحدِّدْ اتِّجاهَه عندَ مركزِ الحلقةِ. (مستوى الحلقةِ والسلكِ ينطبقانِ على مستوى الصفحةِ.)



الحـــلّ

1. أعرِّف

المعطى: $I = 6.0\ \text{A}$ $\quad r = 0.04\ \text{m}$

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\ \text{T·m/A}$

المجهول: $B_{\text{كلّي}} = ?$

2. أخطِّط

أختارُ معادلةً أو موقفًا: أستعمل علاقةَ المجالِ المغناطيسيِّ لتيّارٍ مستمرٍّ يمرُّ في ملفٍّ دائريٍّ، عندَ مركزِ الملفِّ.

$$B_1 = \frac{\mu_o NI}{2r}$$

ثمَّ علاقةَ المجالِ المغناطيسيِّ لتيّارٍ مستمرٍّ يمرُّ في سلكٍ طويلٍ: $B_2 = \frac{\mu_o I}{2\pi d}$

3. أحسب

أعوّضُ القيمَ في المعادلاتِ وأحلُّ:

$$B_1 = \frac{\mu_0 NI}{2r} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 1 \times 6.0}{2 \times 0.04}$$

$$B_1 = 9.4 \times 10^{-5}\ \text{T}$$

$$B_2 = \frac{\mu_0 I}{2\pi d} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 6.0}{2\pi \times 0.04}$$

$$B_2 = 3.0 \times 10^{-5}\ \text{T}$$

المجالانِ متعاكسانِ، لذلك يكونُ مقدارُ محصِّلتِهما:

$$B_{\text{كلّي}} = B_1 - B_2$$

$$B_{\text{كلّي}} = (9.4 \times 10^{-5}\ \text{T}) - (3.0 \times 10^{-5}\ \text{T})$$

$$\boxed{B_{\text{كلّي}} = 6.4 \times 10^{-5}\ \text{T}}$$

ويكونُ اتِّجاهُها عموديًّا على مستوى الورقةِ نحوَ الخارجِ.

تطبيق 5 (ب)

المجالُ المغناطيسيُّ لتيّارٍ مستمرٍّ في ملفٍّ دائريٍّ

استعمل $\mu_o = 4\pi \times 10^{-7}\ \text{T•m/A}$

1. احسبْ مقدارَ المجالِ المغناطيسيِّ عندَ مركزِ ملفٍّ دائريٍّ مؤلَّفٍ من 10 لفّاتٍ ونصفُ قطرِه 10 cm عندَ مرورِ تيّارٍ شدَّتُه 20 A في الملفِّ.
2. يمرُّ تيّارٌ كهربائيٌّ في حلقةٍ دائريَّةٍ (مؤلَّفةٍ من لفَّةٍ واحدةٍ) قطرُها 50 cm. احسبْ شدَّةَ التيّارِ إذا كانَتْ شدَّةُ المجالِ المغناطيسيِّ عندَ مركزِ الحلقةِ $2\pi \times 10^{-5}$ T.

نشاط عملي سريع

الكهرومغناطيسيَّة

المواد

- ✓ بطّاريةٌ جافَّةٌ D
- ✓ سلكٌ معزولٌ طولُه 1 m
- ✓ مسمارٌ كبيرٌ
- ✓ بوصلةٌ
- ✓ مشبكُ ورقٍ معدنيٌّ

قمْ بلفِّ السلكِ حولَ المسمارِ، كما هو موضَّحٌ أدناه. أزلِ البلاستيكَ العازلَ من طرفَيِ السلكِ، ووصِّلْهما بطرفَيِ البطّاريَّةِ.

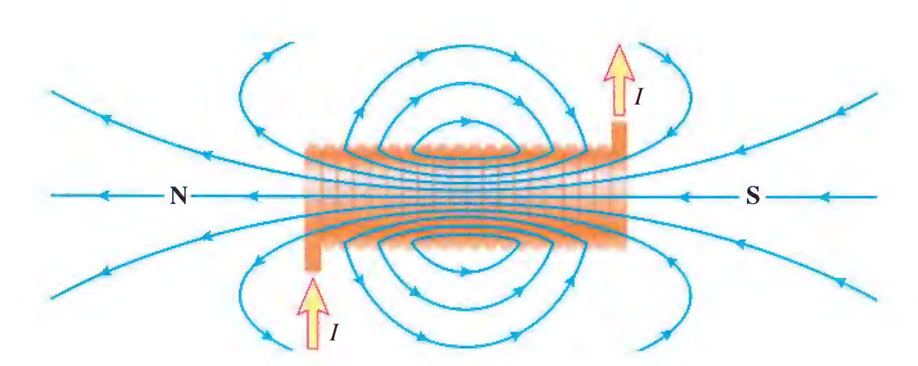


استعملِ البوصلةَ لتعرفَ إن كانَ المسمارُ قد تمغنطَ.

بعدَ ذلك، بدِّلْ قطبيَّةَ البطّاريَّةِ، بحيثُ تعكسُ اتِّجاهَ التيّارِ الكهربائيِّ في السلكِ. ضعِ البوصلةَ مرَّةً أخرى عندَ النقطةِ نفسِها قربَ المسمارِ. هل يمكنُكَ تبريرُ اصطفافِ البوصلةِ الآنَ في اتِّجاهٍ مختلفٍ؟
ضعْ مشابكَ ورقٍ معدنيَّةً قربَ المسمارِ، بعدَ توصيلِه بالبطّاريَّةِ. ماذا يحدثُ للمشابكِ؟ كم مشبكًا يمكنُكَ أن تلتقطَ؟

المجالُ المغناطيسيُّ لتيّارٍ كهربائيٍّ مستمرٍّ يمرُّ في ملفٍّ لولبيٍّ (حلزونيٍّ)

إذا تمَّ لفُّ سلكٍ طويلٍ يُكوِّنَ عدَّةَ حلقاتٍ متراصَّةٍ ومتلاحقةٍ، كما هو موضَّحٌ في **الشكل 5-5**، فإن الجهازَ الناتجَ يُسمّى الملفَّ اللولبيَّ.



الشكل 5-5

المجالُ المغناطيسيُّ داخلَ الملفِّ اللولبيِّ قويٌّ وشبهُ منتظم. لاحظْ أن خطوطَ المجالِ تُشابهُ خطوطَ مجالِ القضيبِ المغناطيسيِّ. لذلك يكونُ للملفِّ قطبٌ شماليٌّ وقطبٌ جنوبيٌّ.

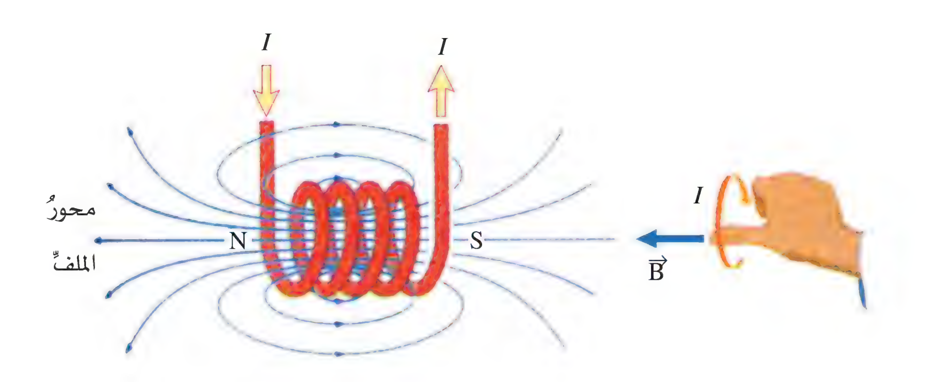
الملفُّ اللولبيُّ مهمٌّ جدًّا في الكثيرِ من التطبيقات، لأنه يؤثِّرُ كقضيبٍ مغناطيسيٍّ عندَ مرورِ التيّارِ فيه. تزدادُ شدَّةُ المجالِ المغناطيسيِّ داخلَ الملفِّ اللولبيِّ بازديادِ التيّارِ المارِّ فيه، كما تتناسبُ طرديًّا مع عددِ اللفّاتِ في وحدةِ الطول. يمكنُ زيادةُ مقدارِ المجالِ المغناطيسيِّ داخلَ الملفِّ بإدخالِ قضيبٍ حديديٍّ بداخلِه. ويعتمدُ مقدارُ المجالِ المغناطيسيِّ عندَ أيَّةِ نقطةٍ على المحورِ داخلَ الملفِّ اللولبيِّ على شدَّةِ التيّارِ الكهربائيِّ I وعلى عددِ اللفّاتِ في وحدةِ الأطوالِ ونفاذيَّةِ الوسطِ كما في العلاقة:

$$B = \frac{\mu N I}{l}$$

حيثُ أن N العددُ الكلّيُّ للفّاتِ الملفِّ اللولبيِّ، و l طولُ الملفِّ اللولبيِّ.

يُظهرُ **الشكلُ 5-5** خطوطَ المجالِ المغناطيسيِّ لملفٍّ لولبيٍّ. لاحظْ أن خطوطَ المجالِ داخلَ الملفِّ تتَّخذُ كُلُّها الاتِّجاهَ نفسَه، وهي تقريبًا متوازيةٌ وتفصلُ بينَها مسافاتٌ مُتساويةٌ. هذا يدلُّ على أن المجالَ داخلَ الملفِّ قويٌّ وشبهُ منتظم. في حينِ أنَّ المجالَ خارجَ الملفِّ، يكونُ غيرَ منتظمٍ، وأضعفَ كثيرًا مقارنةً مع داخلِ الملفِّ. تُستعملُ الملفّاتُ اللولبيَّةُ في الكثيرِ من التطبيقاتِ، بدءًا بمعظمِ الأدواتِ المنزليَّةِ، وانتهاءً بالأجهزةِ الطبّيَّةِ الفائقةِ الدقَّةِ.

لتعيينِ قطبَيِ الملفِّ اللولبيِّ الذي يحملُ تيّارًا كهربائيًّا، نستعملُ قاعدةَ اليدِ اليُمنى كما في **الشكل 6-5**.



الشكل 6-5

تستعملُ قاعدةَ اليدِ اليُمنى لتحديدِ اتِّجاهِ المجالِ المغناطيسيِّ داخلَ ملفٍّ لولبيٍّ.

مثال 5 (ج)

المجالُ المغناطيسيُّ لتيّارٍ مستمرٍّ يمرُّ في ملفٍّ لولبيٍّ

المسألة

ملفٌّ لولبيٌّ هوائيٌّ طويلٌ يتكوَّنُ من 1400 لفَّةٍ، وطولُه 70.0 cm. احسبْ مقدارَ المجالِ المغناطيسيِّ عندَ نقطةٍ في منتصفِ ملفٍّ لولبيٍّ على محورِه الرئيسيِّ وبعيدًا عن طرفيه، إذا كان تيّارُ الملفِّ 4.7 A.

الحـــلّ

1. أعرِّف

المعطى: $N = 1400$ لفَّة $\quad l = 70.0\ \text{cm} \quad I = 4.7\ \text{A}$

المجهول: $B = ?$

2. أخطِّط

أختارُ معادلةً أو موقفًا: أستعملُ العلاقةَ $B = \dfrac{\mu NI}{l}$

3. أحسب

أعوِّضُ القيمَ في المعادلةِ وأحلُّ:

$$B = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 1400 \times 4.7}{70.0 \times 10^{-2}} = \boxed{1.2 \times 10^{-2}\ \text{T}}$$

تطبيق 5 (ج)

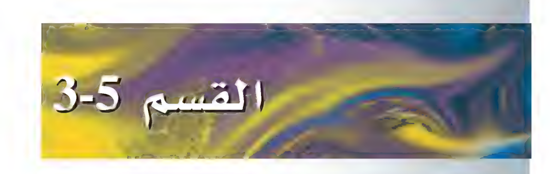
المجالُ المغناطيسيُّ لتيّارٍ مستمرٍّ يمرُّ في ملفٍّ لولبيٍّ

استعملْ $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\ \text{T•m/A}$

1. يتألَّفُ ملفٌّ لولبيٌّ من 2000 لفّةٍ وطولُه 50 cm.
   أ. احسبْ عددَ لفّاتِ الملفِّ في وحدةِ الطول.
   ب. احسبْ مقدارَ المجالِ المغناطيسيِّ في منتصفِ الملفِّ وعلى محورِه عندَ مرورِ تيّارٍ شدّتُه 10 A في لفّاتِه.
2. ما شدَّةُ التيّارِ الكهربائيِّ المارِّ في ملفٍّ لولبيٍّ طولُه 100 cm وعددُ لفّاتِه 1500 لفّةٍ إذا كان مقدارُ المجالِ المغناطيسيِّ في منتصفِه وعلى محورِه $6\pi \times 10^{-3}\ \text{T}$؟

مراجعةُ القسم 5-2

1. ما شكلُ المجالِ المغناطيسيِّ الناتجِ عن سلكٍ طويلٍ مستقيمٍ ينقلُ تيّارًا كهربائيًّا مستمرًّا؟
2. لماذا يكونُ المجالُ المغناطيسيُّ داخلَ ملفٍّ لولبيٍّ أقوى من المجالِ المغناطيسيِّ خارجَه؟
3. بما أن الإلكتروناتِ الدوّارةَ تُنتجُ مجالاً مغناطيسيًّا، فلمَ لا تكونُ كلُّ الذرّاتِ مغانطَ؟



القوَّةُ المغناطيسيَّةُ
Magnetic Force

3-5 أهداف القسم

- يحدِّدُ شدَّةَ المجالِ المغناطيسيِّ بمعرفةِ القوةِ التي تؤثِّرُ في شحنةٍ متحرِّكةٍ ضمنَ مجالٍ مغناطيسيٍّ.
- يستعملُ قاعدةَ اليدِ اليُمنى لتحديدِ اتّجاهِ القوَّةِ المؤثِّرةِ في شحنةٍ متحرِّكةٍ ضمنَ مجالٍ مغناطيسيٍّ.
- يحدِّدُ مقدارَ واتّجاهَ القوَّةِ المؤثِّرةِ في سلكٍ يحملُ تيّارًا ويقعُ في منطقةِ مجالٍ مغناطيسيٍّ.

الجُسيماتُ المشحونةُ في المجالِ المغناطيسيِّ

مع أن التجاربَ قد أظهرَتْ أن المجالَ المغناطيسيَّ الثابتَ لا يؤثِّرُ بأيِّ قوَّةٍ على الجُسيماتِ المشحونةِ الساكنةِ، فإن الشحناتِ المتحرِّكةَ في مجالٍ مغناطيسيٍّ تتعرَّضُ لقوَّةٍ مغناطيسيَّةٍ. يكونُ مقدارُ هذه القوَّةِ أقصى ما يمكنُ إذا كانَ اتِّجاهُ سيرِ الشحنةِ عموديًّا على اتِّجاهِ المجالِ المغناطيسيِّ. ويكونُ مقدارُ هذه القوَّةِ أقلَّ للزوايا الأخرى. ويصبحُ صفرًا إذا تحرَّكَتِ الشحنةُ باتِّجاهِ خطوطِ المجالِ. للتبسيطِ، ندرسُ فقط حالتَي الشحناتِ المُوازيةِ لخطوطِ المجالِ المغناطيسيِّ، والشحناتِ العموديَّةِ عليها.

القوَّةُ المؤثِّرةُ في شحنةٍ تتحرَّكُ ضمنَ مجالٍ مغناطيسيٍّ

نذكِّرُ بأن المجالَ الكهربائيَّ عندَ نقطةٍ في الفضاءِ، يُعرَّفُ بالقوَّةِ الكهربائيَّةِ التي تؤثِّرُ في شحنةِ اختبارٍ موجودةٍ عندَ تلك النقطةِ. يمكنُنا وصفُ خصائصِ المجالِ المغناطيسيِّ $\vec{B}$ بطريقةٍ مشابهةٍ بدلالةِ القوَّةِ المغناطيسيَّةِ المؤثِّرةِ في شحنةِ اختبارٍ عندَ نقطةٍ معيَّنةٍ. لتكُنْ شحنةُ اختبارِنا شحنةً موجبةً q، تتحرَّكُ بسرعةِ $\vec{v}$ عموديَّةٍ على اتِّجاهِ $\vec{B}$. لقد ثبتَ بوساطةِ التجربةِ أن مقدارَ القوَّةِ المغناطيسيَّةِ على جسمٍ مشحونٍ يتحرَّكُ عموديًّا على المجالِ المغناطيسيِّ، يساوي حاصلَ ضربِ مقدارِ الشحنةِ q في مقدارِ السرعةِ v في شدَّةِ المجالِ المغناطيسيِّ B، كما هو موضَّحٌ في العلاقةِ التاليةِ:

$$F_{\text{المغناطيسية}} = qvB$$

يمكنُ إعادةُ ترتيبِ هذه العلاقةِ كما يلي:

مقدارُ المجالِ المغناطيسيِّ

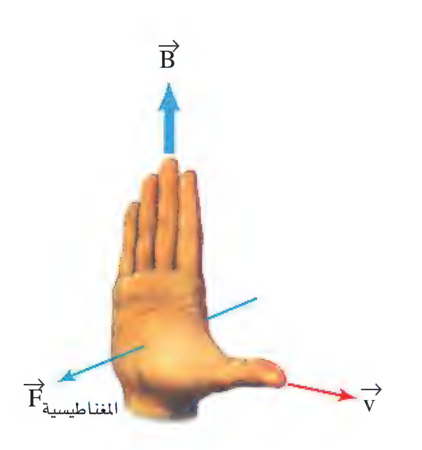
$$B = \frac{F_{\text{المغناطيسية}}}{qv}$$

$$\text{مقدارَ المجالِ المغناطيسيِّ} = \frac{\text{مقدارُ القوَّةِ المغناطيسيَّةِ على جُسيمٍ مشحونٍ}}{(\text{مقدارِ سرعةِ الشحنةِ}) \times (\text{مقدارِ الشحنةِ})}$$

إذا قسْتَ القوَّةَ بوحدةِ نيوتن، والشحنةَ بوحدةِ كولومب، والسرعةَ بوحدةِ مترٍ في الثانيةِ، تكونُ وحدةُ قياسِ شدَّةِ المجالِ المغناطيسيِّ تسلا (T). وبناءً على ذلك، إذا تحرَّكَتْ شحنةُ 1C بسرعةٍ مقدارُها 1 m/s، عموديًّا على مجالٍ مغناطيسيٍّ، وتعرَّضَتْ لقوَّةٍ مغناطيسيَّةٍ مقدارُها 1N، تكونُ شدَّةُ المجالِ المغناطيسيِّ 1T. معظمُ المجالاتِ المغناطيسيَّةِ أقلُّ كثيرًا من 1T. يمكنُنا كتابةُ وحدةِ قياسِ المجالِ المغناطيسيِّ كما يلي:

$$T = \frac{N}{C \bullet m/s} = \frac{N}{A \bullet m} = \frac{V \bullet s}{m^2}$$

يمكنُ لمغانطِ المختبراتِ المعروفةِ أن تُنتجَ مجالاتٍ مغناطيسيَّةً تصلُ شدَّتُها إلى 1.5 T. كما تمَّ إنشاءُ مغانطَ فائقةِ الموصليَّةِ، تصلُ شدَّةُ مجالِها المغناطيسيِّ إلى 30 T. بالمقارنةِ، لا تُجاوزُ شدَّةُ المجالِ المغناطيسيِّ للأرضِ عندَ سطحِها $50\ \mu T\ (5 \times 10^{-5}\ T)$.



الشكل 5-7
استعمالُ قاعدةِ اليدِ اليُمنى لإيجادِ اتِّجاهِ القوَّةِ المغناطيسيَّةِ على شحنةٍ موجبةٍ.

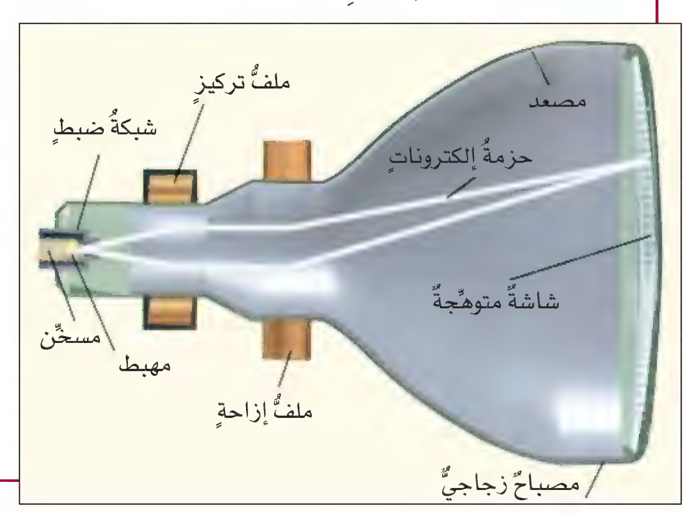
قاعدةُ اليدِ اليُمنى التي تُستعمل لمعرفةِ اتِّجاهِ القوَّةِ المغناطيسيَّةِ

أظهرَتِ التجاربُ أن اتِّجاهَ القوَّةِ المغناطيسيَّةِ يكونُ دائمًا عموديًّا على كلٍّ من السرعة $\vec{v}$ والمجالِ المغناطيسيِّ $\vec{B}$. ولإيجادِ اتِّجاهِ هذه القوَّةِ، استعملْ قاعدةَ اليدِ اليُمنى. كما في السابقِ، ضعْ أصابعَك في اتِّجاهِ $\vec{B}$، بحيثُ يكونُ اتِّجاهُ إبهامِك في اتِّجاهِ $\vec{v}$، كما هو موضَّحٌ في **الشكل 5-7**. يكونُ اتِّجاهُ القوةِ المغناطيسيَّةِ $\vec{F}_{\text{المغناطيسية}}$ على شحنةٍ موجبةٍ إلى خارجِ راحةِ اليدِ.

إذا كانَتِ الشحنةُ سالبةً، يكونُ اتِّجاهُ القوَّةِ معاكسًا لاتِّجاهِها في **الشكل 5-7**. أي إذا كانَتْ q سالبةً، استعملْ قاعدةَ اليدِ اليُمنى لمعرفةِ اتِّجاهِ $\vec{F}_{\text{المغناطيسية}}$ لـ q الموجبةِ، ثم اعكسْهُ فيتمثَّلُ اتِّجاهُ القوَّةِ في حالةِ الشحنةِ السالبةِ.

نافذةٌ على الموضوع
شاشاتُ التلفازِ

تُستعملُ القوَّةُ المؤثِّرةُ في شحنةٍ ضمنَ مجالٍ مغناطيسيٍّ، لإنتاجِ الصورِ على شاشةِ التلفازِ. المكوِّنُ الأساسيُّ لجهازِ التلفازِ هو أنبوبُ أشعَّةِ مهبطٍ، وهو أنبوبُ تفريغٍ يقومُ فيه مجالٌ كهربائيٌّ بتكوينِ حزمةٍ من الإلكتروناتِ. يتوهَّجُ الفوسفورُ على شاشةِ التلفازِ، عندَما تسقطُ الإلكتروناتُ عليه.



إذا تركت الحزمة لتسقط تلقائيًّا على الشاشة، فإنها تضيء نقطة واحدة في مركز الشاشة. يمكنُ تغييرُ اتِّجاهِ الحزمةِ، بوساطةِ مغناطيسَيْنِ كهربائيَّيْنِ أحدُهما يحرفُها في الاتِّجاهِ الأفقيِّ، والآخرُ في الاتِّجاهِ الشاقوليِّ. يمكنُ تغييرُ اتِّجاهِ الحزمةِ، بتغييرِ اتِّجاهِ التيّارِ في مغناطيسٍ كهربائيٍّ. وهكذا يمكنُ إضاءةُ أيِّ جزءٍ من أجزاءِ الشاشةِ.

في أجهزةِ التلفازِ الملوَّنةِ، تستعملُ ثلاثةُ ألوانٍ فوسفوريَّةٍ، هي: الأحمرُ والأخضرُ والأزرقُ. وهناك ثلاثُ حزمٍ إلكترونيَّةٍ، واحدةٌ من كلِّ لونٍ، تتحرَّكُ في أنحاءِ الشاشةِ كافَّةً لإنتاجِ الصورةِ الملوَّنةِ.

في أنبوبِ أشعَّةِ المهبطِ، يكونُ المهبطُ فتيلةً مسخَّنةً بداخلِ الأنبوبِ المفرَّغِ، شبيهةً بفتيلةِ المصباحِ المتوهِّجِ. يكونُ الشعاعُ سيلًا من الإلكتروناتِ المنطلقةِ من الفتيلةِ نحوَ داخلِ الأنبوبِ المفرَّغِ.

مثال 5 (د)

الجسيمات المشحونة في المجال المغناطيسيّ

المسألة

يتحرَّكُ بروتونٌ باتِّجاهِ الشرقِ، ويتعرَّضُ لقوَّةٍ مغناطيسيَّةٍ مقدارُها 8.8×10^{-19} N إلى أعلى، نتيجةً للمجالِ المغناطيسيِّ للكرةِ الأرضيَّةِ. في هذهِ النقطةِ، يكونُ مقدارُ المجالِ المغناطيسيِّ الأرضيِّ 5.5×10^{-5} T. احسُبْ سرعةَ البروتونِ.

الحلّ

1. أعرِّف

المعطى: $q = 1.60 \times 10^{-19}$ C $\quad B = 5.5 \times 10^{-5}$ T

$F_{\text{المغناطيسية}} = 8.8 \times 10^{-19}$ N

المجهول: $v = ?$

2. أخطِّط

أستعملُ تعريفَ شدَّةِ المجالِ المغناطيسيِّ. أعيدُ ترتيبَ المعادلةِ لأحسبَ v.

$$B = \frac{F_{\text{المغناطيسية}}}{qv}$$

$$v = \frac{F_{\text{المغناطيسية}}}{qB}$$

3. أحسب

$$v = \frac{8.8 \times 10^{-19}\ \text{N}}{(1.60 \times 10^{-19}\ \text{C})(5.5 \times 10^{-5}\ \text{T})} = \boxed{1.0 \times 10^{5}\ \text{m/s}}$$



يمكنُ استعمال الاتِّجاه المعطى للتحقُّق من قاعدة اليد اليُمنى. افترضْ أنك تقفُ عندَ هذه النقطةِ وتواجهُ الشمالَ. ضعْ كفَّ يدكَ اليُمنى إلى أعلى (باتِّجاه القوَّة)، بينَما يُشيرُ إبهامُكَ نحوَ الشرقِ (باتِّجاه السرعة). إذا كانَتْ كفُّكَ وإبهامُك في الاتِّجاهَيْن المذكورَيْن، فإن أصابعَكَ ستشيرُ نحوَ الشمالِ في اتِّجاه المجالِ المغناطيسيِّ الأرضيِّ، كما هي الحالةُ فعلاً.

تطبيق 5 (د)

الجسيمات المشحونة في المجال المغناطيسيّ

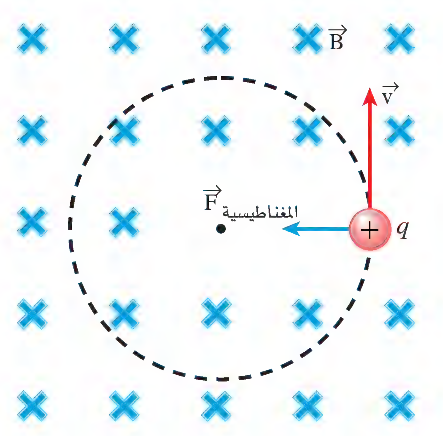
1. إذا تعرَّضَ إلكترونٌ في حزمةِ إلكتروناتٍ لقوَّةٍ إلى أسفلَ مقدارُها 2.0×10^{-14} N بينَما يتحرَّكُ في مجالٍ مغناطيسيٍّ شدَّتُه 8.3×10^{-2} T باتِّجاهِ الغربِ، فما اتِّجاهُ سُرعتِه ومقدارُها؟

2. يتَّجهُ مجالٌ مغناطيسيٌّ شدَّتُه 1.5 T نحوَ الشمالِ. إذا تحرَّكَ إلكترونٌ رأسيًّا إلى أسفلَ (باتِّجاهِ الأرضِ) بسرعةٍ مقدارُها 2.5×10^{7} m/s في المجالِ المذكورِ، فما مقدارُ القوَّةِ المؤثِّرةِ فيه واتِّجاهُها؟

المسارُ الدائريُّ لشحنةٍ في مجالٍ مغناطيسيٍّ

افترضْ جُسيمًا ذا شحنةٍ موجبةٍ يتحرَّكُ في مجالٍ مغناطيسيٍّ. وافترضْ أن اتِّجاهَ السرعةِ الابتدائيَّةِ عموديٌّ على المجالِ، كما في **الشكل 5-8**. يوضِّحُ تطبيقُ قاعدةِ اليدِ اليُمنى أن اتِّجاهَ القوةِ المغناطيسيَّةِ $\vec{F}_{\text{المغناطيسية}}$ على الشحنةِ q هو نحوَ اليسارِ. كما أن تطبيقَ قاعدةِ اليدِ اليُمنى عندَ أيِّ نقطةٍ، يوضِّحُ أن اتِّجاهَ القوَّةِ المغناطيسيَّةِ هو دائمًا باتِّجاهِ مركزِ المسارِ الدائريِّ. هذا يعني أن القوَّةَ المغناطيسيَّةَ قوَّةٌ تحقِّقُ الحركةَ الدائريَّةَ، وأن التغيُّرَ يحدثُ فقط في اتِّجاهِ $\vec{v}$، وليسَ في مقدارِها.

افترضِ الآنَ جسيمًا مشحونًا يسيرُ بسرعةٍ ابتدائيَّةٍ ليسَتْ عموديَّةً على المجالِ المغناطيسيِّ. تكونُ إحدى مركَّبتَي السرعةِ الابتدائيَّةِ موازيةً للمجالِ المغناطيسيِّ. لا تتأثَّرُ هذه المركَّبةُ بالمجالِ المغناطيسيِّ، وهذا الجزءُ من الحركةِ يبقى منتظمًا. بينما تؤدّي المركَّبةُ العموديَّةُ للسرعةِ الابتدائيَّةِ إلى حركةٍ دائريَّةٍ كما تمَّ شرحُه سابقًا. تسيرُ الشحنةُ نتيجةً لذلك على مسارٍ لولبيٍّ محورُه موازٍ للمجالِ المغناطيسيِّ.



الشكل 5-8
عندَما تكونُ السرعةُ $\vec{v}$ لجسيمٍ مشحونٍ عموديَّةً على المجالِ المغناطيسيِّ، يسيرُ الجسيمُ في مسارٍ دائريٍّ على دائرةٍ في مستوى عموديٍّ على $\vec{B}$.

القوَّةُ المغناطيسيَّةُ على موصِّلٍ يحملُ تيّارًا مستمرًّا

نذكِّرُ بأن التيّارَ الكهربائيَّ جُسيماتٌ مشحونةٌ متحرِّكةٌ. بما أن الشحنةَ تتعرَّضُ لقوَّةٍ مغناطيسيَّةٍ عندَ تحرُّكِها في مجالٍ مغناطيسيٍّ، فلن يكونَ مفاجئًا تعرُّضُ السلكِ الناقلِ للتيّارِ الكهربائيِّ لقوَّةٍ مغناطيسيَّةٍ عندَ وضعِه في مجالٍ مغناطيسيٍّ. تكونُ محصِّلةُ القوَّى على السلكِ جمعَ القوى المغناطيسيَّةِ المتفرِّقةِ على جُسيماتِهِ المشحونةِ كافَّةً. تنتقلُ القُوى المؤثِّرةُ في جسيماتِ السلكِ إلى عمقِه من خلالِ التصادماتِ مع الذرّاتِ المكوِّنةِ للسلكِ.

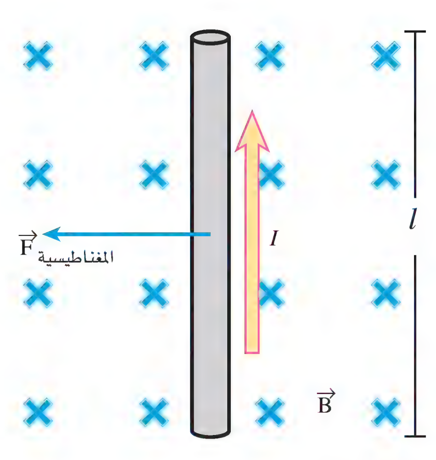
افترضْ جزءًا مستقيمًا من السلكِ طولُه l يحملُ تيّارًا I موضوعًا في مجالٍ مغناطيسيٍّ $\vec{B}$، كما في **الشكل 5-9**. عندَما يكونُ التيّارُ والمجالُ المغناطيسيُّ متعامدَيْنِ، يُعطى مقدارُ محصِّلةِ القوى المغناطيسيَّةِ على السلكِ بوساطةِ المعادلةِ التاليةِ:

القوَّةُ على موصِّلٍ ناقلٍ للتيّارِ وعموديٍّ على مجالٍ مغناطيسيٍّ

$$F_{\text{المغناطيسية}} = BIl$$

القوَّةُ المغناطيسيَّةُ = مقدارُ المجالِ المغناطيسيِّ × التيّار × طولِ الموصِّلِ الواقعِ في $\vec{B}$

يمكنُ تحديدُ اتِّجاهِ القوَّةِ المغناطيسيَّةِ على سلكٍ، باستعمالِ قاعدةِ اليدِ اليُمنى. يكونُ اتِّجاهُ إبهامِك في هذه الحالةِ مع اتِّجاهِ التيّارِ بدلاً من اتِّجاهِ السرعةِ $\vec{v}$. في **الشكل 5-9** يكونُ اتِّجاهُ القوَّةِ المغناطيسيَّةِ على السلكِ إلى اليسارِ. عندَما يكونُ التيّارُ في اتِّجاهِ المجالِ المغناطيسيِّ، أو معاكسًا له، تكونُ القوَّةُ المغناطيسيَّةُ على السلكِ صفرًا.

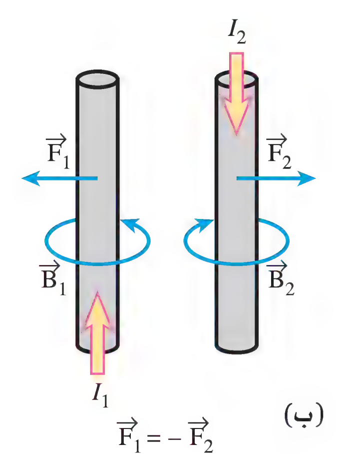


الشكل 5-9
يتعرَّضُ الموصِّلُ الناقلُ للتيّارِ الكهربائيِّ، عندَ وضعِهِ في مجالٍ مغناطيسيٍّ، لقوَّةٍ عموديَّةٍ على اتجاهِ التيّارِ.

القوّةُ المتبادلةُ بينَ موصِّلَيْن متوازيَيْن ينقلان تيّارَيْن كهربائيَّين

بما أن التيّارَ المارَّ في موصِّلٍ يُنشيءُ مجالاً مغناطيسيًّا خاصًّا به، فإن ذلك يسهِّلُ فهمَ وجودِ قوّةٍ مغناطيسيَّةٍ متبادلةٍ بين سلكَيْن متقاربَيْن ناقلَيْن للتيّار. عندَما يكونُ الموصِّلان متوازيَيْن، يكونُ المجالُ المغناطيسيُّ الناتجُ من أحدِهما عموديًّا على التيّارِ الكهربائيِّ المارِّ في الآخرِ، والعكسُ بالعكس. في هذه الحالةِ تؤثِّرُ قوّةٌ مغناطيسيَّةٌ $F_{\text{المغناطيسية}} = BIl$ على كلِّ سلكٍ، حيث B شدَّةُ المجالِ المغناطيسيِّ الناتجِ عن السلكِ الآخر.

افترضْ أن هناكَ سلكَيْن طويلَيْن متوازيَيْن، كالموضَّحَيْن في **الشكل 5-10**. عندَما يكونُ التيّاران في السلكَيْن لهما الاتِّجاهُ نفسُه يتجاذبُ السلكان. تأكَّدْ من ذلك باستعمال قاعدةِ اليدِ اليُمنى. ضعْ إبهامَكَ في اتِّجاهِ التيّارِ وباقي أصابعِك في اتِّجاهِ المجالِ المغناطيسيِّ الناتجِ عن التيّارِ في السلكِ. سوفَ تلاحظُ أن اتِّجاهَ القوَّةِ المغناطيسيَّةِ (المنطلقَ إلى خارجِ راحةِ اليدِ) يشيرُ نحوَ السلكِ الآخرِ. عندَما يكونُ اتِّجاها التيّارَيْن في السلكَيْن متعاكسَيْن، تكونُ القوَّةُ المغناطيسيَّةُ بينَهما قوَّةَ تنافُرٍ.



الشكل 5-10
سلكانِ متوازيانِ ينقلانِ تيّارَيْن ثابتَيْن، يؤثِّرانِ بقوَّةٍ مغناطيسيَّةٍ أحدُهما في الآخرِ. القوَّةُ في (أ) قوَّةُ تجاذبٍ إذا كانَ للتيّارَيْن الاتجاهُ نفسُه، و(ب) قوَّةُ تنافرٍ إذا كانَ للتيّارَيْن اتجاهان متعاكسان.

تطبيقات على القوة المغناطيسية المؤثِّرة في موصل يحمل تيارًا

استعمالُ المغانطِ في مكبِّراتِ الصوتِ

مكبِّراتُ الصوتِ في معظمِ الأجهزةِ الصوتيَّةِ تُستعملُ فيها قوَّةٌ مغناطيسيَّةٌ تؤثِّرُ في سلكٍ ناقلٍ للتيّارِ، لإنتاجِ الموجاتِ الصوتيَّةِ. يتألَّفُ أحدُ أنواعِ مكبِّراتِ الصوتِ، وهو الموضَّحُ في **الشكل 5-11**، من مخروطٍ ورقيٍّ مرنٍ، متَّصلٍ بملفٍّ يقومُ بدورِ المكبِّرِ، مع مغناطيسٍ دائمٍ. في نظامِ مكبِّرِ الصوتِ، تتحوَّلُ الإشارةُ الصوتيَّةُ إلى إشارةٍ كهربائيَّةٍ متناوبةٍ بوساطةِ المذياعِ. تُضخَّمُ هذه الإشارةُ الكهربائيَّةُ، وتُرسلُ إلى مكبِّرِ الصوتِ، حيث تؤدّي هذه الإشارةُ المتناوبةُ إلى قوَّةٍ مغناطيسيَّةٍ متناوبةٍ تؤثِّرُ في الملفِّ. تؤدّي هذه القوّةُ المتناوبةُ على الملفِّ إلى اهتزازٍ في المخروطِ المتَّصلِ به والذي ينتجُ بدورِه اختلالاً في كثافةِ الهواءِ أمامَه. بهذه الطريقةِ، تتحوَّلُ الإشارةُ الكهربائيَّةُ إلى موجةٍ صوتيَّةٍ تشبهُ الموجةَ الصوتيَّةَ الأساسيَّةَ الناتجةَ عن المصدرِ.



الشكل 5-11
عندَما يتغيَّرُ اتِّجاهُ التيّارِ ومقدارُه في الملفِّ السلكيِّ لمكبِّرٍ صوتيٍّ، يهتزُّ المخروطُ الورقيُّ المتَّصلُ بالملفِّ، مصدرًا موجاتٍ صوتيَّةً.

مثال 5 (هـ)

القوَّةُ المغناطيسيةُ على موصِّلٍ ينقلُ تيّارًا

المسألة

ينقلُ سلكٌ طولُه 36 m تيّارًا شدَّتُه 22 A من الشرقِ نحوَ الغرب. إذا كانَتِ القوَّةُ المغناطيسيَّةُ على السلكِ نتيجةً للمجالِ المغناطيسيِّ للأرضِ تتَّجهُ إلى أسفلَ (نحوَ الأرض) ومقدارُها 4.0×10^{-2} N، فما مقدارُ المجالِ المغناطيسيِّ في تلك المنطقةِ؟ وما اتِّجاهُهُ؟

الحــلّ

1. أعرِّف

المعطى: $l = 36\ \text{m}$ $\quad I = 22\ \text{A}$

$F_{\text{المغناطيسية}} = 4.0 \times 10^{-2}\ \text{N}$

المجهول: $B = ?$

2. أخطِّط

أستعمل معادلةَ القوَّةِ المؤثِّرةِ في سلكٍ موصِّلٍ ناقلٍ للتيّار وعموديٍّ على مجالٍ مغناطيسيٍّ.

$$F_{\text{المغناطيسية}} = BIl$$

أعيدُ الترتيبَ لأحسبَ B.

3. أحسب

$$B = \frac{F_{\text{المغناطيسية}}}{I\,l} = \frac{4.0 \times 10^{-2}\ \text{N}}{(22\ \text{A})\ (36\ \text{m})} = \boxed{5.0 \times 10^{-5}\ \text{T}}$$

أستعملُ قاعدةَ اليدِ اليُمنى لإيجادِ اتِّجاهِ $\vec{B}$، فأنظرُ نحوَ الشمال، بينَما يدلُّ إبهامي نحوَ الغربِ (باتِّجاهِ التيّارِ)، وراحةُ يدي إلى أسفلَ (باتِّجاهِ القوَّةِ). عندَها تدلُّ أصابعُ يدي نحوَ الشمالِ. بناءً على ذلك، يكونُ اتِّجاهُ المجالِ المغناطيسيِّ من الجنوبِ نحو الشمالِ.

تطبيق 5 (هـ)

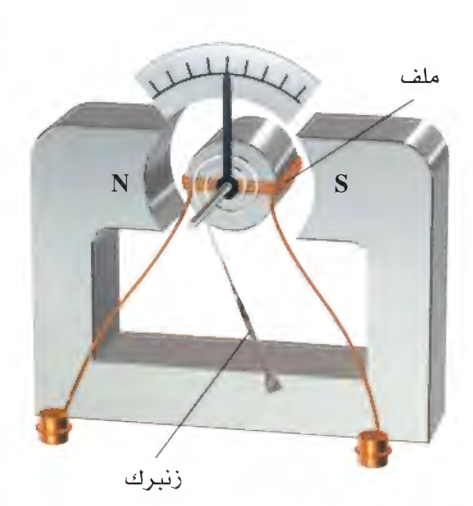
القوَّةُ المغناطيسيةُ على موصِّلٍ ينقلُ تيّارًا

1. ينقلُ سلكٌ طولُه 6.0 m تيارًا شدَّتُه 7.0 A في اتِّجاهِ محورِ x الموجب. تؤثِّرُ في السلكِ قوَّةٌ مقدارُها 7.0×10^{-6} N في اتِّجاهِ محورِ y السالبِ. احسُبْ مقدارَ المجالِ المغناطيسيِّ المُسبِّبِ لهذه القوَّةِ، واتِّجاهَهُ.

2. يتعرَّضُ سلكٌ طولُه 1.0 m لقوَّةٍ مغناطيسيَّةٍ مقدارُها 0.50 N، وعموديَّةٍ على مجالٍ مغناطيسيٍّ منتظمٍ. إذا كانَ التيّارُ الكهربائيُّ المارُّ في السلكِ 10.0 A، فما مقدارُ المجالِ المغناطيسيِّ؟

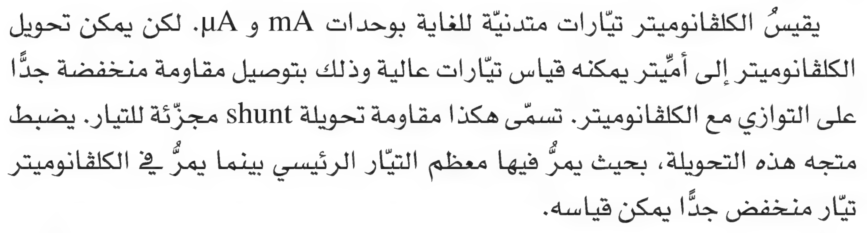
3. القوَّةُ المغناطيسيَّةُ، المؤثِّرةُ في جزءٍ مستقيمٍ من سلكٍ طولُه 0.15 m وينقلُ تيّارًا شدَّتُه 4.5 A، تبلغُ 1.0 N. فما مقدارُ مُركَّبةِ المجالِ المغناطيسيِّ العموديَّةِ على السلكِ؟

الكلفانوميتر



الشكل 5-12
عند مرورِ التيّارِ في ملفِّ الكلفانوميترِ الموجودِ في منطقةِ مجالٍ مغناطيسيٍّ، تؤدّي القوّةُ المغناطيسيّةُ إلى دورانِ الملفِّ.

الكلفانوميترُ جهازٌ يُستعملُ لصنعِ كلٍّ من الفولتميترِ (لقياسِ فرقِ الجُهدِ) والأمّيترِ (لقياسِ شدّةِ التيارِ). طريقةُ عملِ الكلفانوميترِ تعتمد على القوة المغناطيسية التي يؤثّر فيها المجال المغناطيسي على سلك يحمل تيارًا. يظهرُ **الشكلُ 5-12** رسمًا مبسَّطًا للمكوّناتِ الأساسيّةِ للكلفانوميترِ. يتألّفُ الجهازُ من سلكٍ ملفوفٍ حولَ قطعةِ حديدٍ ليّنةٍ يمكنُها الدورانُ بسهولةٍ في منطقةِ مجالٍ مغناطيسيٍّ ناتجةٍ عن مغناطيسٍ دائمٍ. العزمُ الذي يتعرّضُ له الملفُّ يتناسبُ طرديًّا مع شدّةِ التيّارِ الذي يمرُّ فيه. يعني ذلك أنه كلما ازدادَ التيّارُ، يزدادُ عزمُ دورانِ الملفِّ قبلَ أن يوقفَه عزمُ إرجاعِ النابضِ. لذلك يتناسبُ مقدارُ انحرافِ إبرةِ الكلفانوميترِ مع شدّةِ التيّارِ الذي يمرُّ فيه. إذا لم يمرَّ أيُّ تيّارٍ في الملفِّ، يعيدُ الزنبركُ إبرةَ الجهازِ إلى الصفرِ. بعدَ تعييرِ الآلةِ، يمكنُ استعمالها مع عناصرَ أخرى من دائرةٍ كهربائيّةٍ كأمّيترٍ (لقياسِ التيّارِ)، أو كفولتميترٍ (لقياسِ فرقِ الجُهدِ).


يقيسُ الكلفانوميتر تيّارات متدنيّة للغاية بوحدات mA و μA. لكن يمكن تحويل الكلفانوميتر إلى أمّيتر يمكنه قياس تيّارات عالية وذلك بتوصيل مقاومة منخفضة جدًّا على التوازي مع الكلفانوميتر. تسمّى هكذا مقاومة تحويلة shunt مجزّئة للتيار. يضبط متجه هذه التحويلة، بحيث يمرُّ فيها معظم التيّار الرئيسي بينما يمرُّ في الكلفانوميتر تيّار منخفض جدًّا يمكن قياسه.

كما يمكنُ تحويل الكلفانوميتر إلى فولتميتر، وذلك بتوصيلِ مقاومة مرتفعة جدًّا على التوالي مع الكلفانوميتر. بما أن فرق الجهد يتناسب طرديًّا مع المقاومة، فإن معظم فرق الجهد سيكون حول طرفي المقاومة بينما يبقى فرق الجهد منخفضًا جدًّا حول طرفي الكلفانوميتر. كما أن التيّار المارّ في هذا الفرع يكون منخفضًا جدًّا لأن قيمة مقاومة التوالي مرتفعة جدًّا.

مراجعةُ القسم 5-3

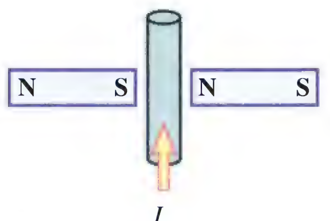
1. جُسيمٌ شحنتُه 0.030 C، يتعرَّضُ لقوّةٍ مغناطيسيّةٍ مقدارُها 1.5 N، عندَ تحرُّكِه بشكلٍ عموديٍّ على مجالٍ مغناطيسيٍّ منتظمٍ. إذا كانَتْ سُرعةُ الجُسيمِ 620 m/s، فما مقدارُ المجالِ المغناطيسيِّ الذي يتحرَّكُ الجُسيمُ بداخلِه؟

2. يدخلُ إلكترونٌ يتحرَّكُ نحوَ الشمالِ في منطقةِ مجالٍ مغناطيسيٍّ منتظمٍ. إذا كانَ اتّجاهُ المجالِ المغناطيسيِّ نحوَ الشرقِ، فما اتّجاهُ القوّةِ المغناطيسيّةِ المؤثّرةِ في الإلكترونِ؟

3. سلكٌ مُستقيمٌ طولُه 25 cm ينقلُ تيّارًا كهربائيًّا شدَّتُه 5.0 A. إذا كانَ السلكُ عموديًّا على مجالٍ مغناطيسيٍّ شدَّتُه 0.60 T، فما مقدارُ القوّةِ المغناطيسيّةِ المؤثّرةِ في السلكِ؟

4. تتحرَّكُ الإلكتروناتُ في سلكَيْنِ متوازِيَيْنِ في الاتّجاهِ نفسِه. هل القوّةُ بينَهما قوّةُ تجاذبٍ أم قوّةُ تنافرٍ؟

5. **تفسيرُ الرسوم:** حدِّدِ اتّجاهَ القوةِ المغناطيسيّةِ على السلكِ الناقلِ للتيّارِ، في **الشكلِ 5-13**.



الشكل 5-13

نافذةٌ على الموضوع

التصويرُ بالرنينِ المغناطيسيِّ

التصويرُ بالرنينِ المغناطيسيِّ، أو MRI، تقنيَّةُ تصويرٍ استُعملتْ في المجالاتِ الطبّيَّةِ منذُ مطلعِ الثمانينيّاتِ في القرنِ الماضي. يسمحُ MRI للأطبّاءِ بالحصولِ على صورٍ ثنائيَّةِ الأبعادِ لنماذجَ ثلاثيَّةِ الأبعادِ لأجزاءٍ من جسمِ الإنسانِ. لقد تطوَّرَ استعمالُ MRI في الطبِّ بشكلٍ سريعٍ، لأن MRI يعطي صورًا دقيقةً وواضحةً، تساهمُ في دراسةِ أنواعٍ مختلفةٍ من الأنسجةِ، وفقَ التطبيقاتِ المطلوبةِ. كما أن MRI أكثرُ أمانًا من التصويرِ الطبقيِّ المحوريِّ (CAT) الذي يعرِّضُ الجسمَ للكثيرِ من أشعَّةِ X.

تبدو آلةُ MRI مكعَّبًا ضخمًا يتراوحُ طولُ ضلعِهِ بينَ متريْنِ وثلاثةِ أمتارٍ، مع فجوةٍ أسطوانيَّةٍ في داخلِه، لإدخالِ المريضِ كما هو موضَّحٌ في الشكلِ. تنتجُ آلةُ MRI مجالاً مغناطيسيًّا تتراوحُ شدَّتُه بينَ 0.5 T و 2.0 T، وهي شدَّةٌ تسمحُ بمسحِ المعلوماتِ عن بطاقاتِ الاعتمادِ، وانتزاعِ الأقلامِ من الجيبِ، في أنحاءِ الغرفةِ التي توجدُ فيها الآلةُ.

وبما أن المقاومةَ تتسبَّبُ في هدرِ كمّيَّةٍ هائلةٍ من الحرارةِ داخلَ المغانطِ الكهربائيَّةِ، لدى إنتاجِ مجالاتٍ مغناطيسيَّةٍ مرتفعةٍ، فإنَّ المغانطَ الكهربائيَّةَ في معظمِ آلاتِ MRI تحتوي على أسلاكٍ مفرطةِ الموصليَّةِ، تكونُ مقاومتُها صفرًا.

يعتمدُ تكوينُ الصورةِ في جهازِ MRI على سلوكِ نواةِ الذرَّةِ تحتَ تأثيرِ المجالِ المغناطيسيِّ في مجالٍ مغناطيسيٍّ مرتفعٍ، تميلُ نواةُ الذرَّةِ إلى الاصطفافِ في اتِّجاهِ المجالِ. هذا السلوكُ يصحُّ بشكلٍ خاصٍّ في ذرّاتِ الهيدروجين، وهي أكثرُ الذرّاتِ انتشارًا في جسمِ الإنسانِ.

المغناطيسُ الأساسيُّ في نظامِ MRI ينتجُ مجالاً مغناطيسيًّا قويًّا ومنتظمًا، يؤثِّرُ في الجزءِ المُرادِ فحصُهُ من جسمِ المريضِ. يجعلُ هذا المجالُ نواةَ الهيدروجين في الجسمِ تصطفُّ في اتِّجاهِه. يتمُّ تشغيلُ وتوقيفُ مغانطَ صغيرةٍ تُسمّى مغانطَ الانحدارِ لإنتاجِ تغيُّراتٍ أو نبضاتٍ صغيرةٍ داخلَ المجالِ المغناطيسيِّ الكلّيِّ. تدفعُ كلٌّ من هذهِ النبضاتِ نواةَ الهيدروجينِ لتزيحَ عن اصطفافِها الأساسيِّ. بعد إزالةِ النبضةِ، تعودُ النواةُ إلى اصطفافِها مُصدرةً بذلكَ موجاتٍ كهرومغناطيسيَّةً في نطاقِ تردُّداتِ الراديو اللاسلكيَّةِ.

تفحصُ المواسحُ في جهازِ MRI موجاتِ الراديو هذه، ويحوِّلُها الحاسوبُ إلى صُورٍ.

يمكنُ رؤيةُ أنواعٍ مختلفةٍ من الخلايا، بوساطةِ جهازِ MRI، وذلك بحسبِ تردُّدِ النبضاتِ وفترةِ تأثيرِها.

تستعملُ أجهزةُ MRI بشكلٍ جيِّدٍ في تصويرِ الدماغِ وأنسجةِ النخاعِ الشوكيِّ. ويمكنُ أن تُستعملَ أيضًا في دراسةِ عملِ الدماغِ والالتهاباتِ السرطانيَّةِ فيه والتصلُّباتِ المتعدِّدةِ، وغيرِها من المشكلاتِ العصبيَّةِ.

كما يُستعمل MRI لإعطاءِ صورةٍ للأوعيةِ الدمويَّةِ، من دونِ النسيجِ المجاورِ، وهي صورةٌ قد تكونُ مفيدةً في دراسةِ جهازِ الدورةِ الدمويَّةِ.

إن أهمَّ سلبياتِ جهازِ MRI كلفتُه الباهظةُ. بالإضافةِ إلى ذلك، لا يمكنُ استعمالُ هذه التقنيَّةِ على بعضِ المرضى.



يكونُ مغناطيسُ التصويرِ، في معظمِ أجهزةِ MRI، من النوعِ المفرطِ الموصليَّةِ. هذا المغناطيسُ هو أغلى قطعةٍ في جهازِ MRI.

ملخّصُ الفصل 5

مصطلحاتٌ أساسيَّة

المجالُ المغناطيسيُّ

Magnetic field (ص 128)

متجه المساحة Area vector (ص 129)

أفكارٌ أساسيَّة

القسم 5-1 المجالاتُ المغناطيسيَّةُ

- الأقطابُ المتشابهةُ تتنافرُ، والأقطابُ المختلفةُ تتجاذبُ.
- يُعرَّفُ اتِّجاهُ المجالِ المغناطيسيِّ بالاتِّجاهِ الذي يشيرُ إليه القُطبُ الشماليُّ لمغناطيسٍ يوضعُ في منطقةِ المجالِ. يتَّجهُ المجالُ المغناطيسيُّ لمغناطيسٍ من قطبِ المغناطيسِ الشماليِّ إلى قطبِهِ الجنوبيِّ.

القسم 5-2 المغناطيسيَّةُ الناتجةُ عن الكهرباءِ

- يتكوَّنُ مجالٌ مغناطيسيٌّ حولَ السلكِ الناقلِ للتيّارِ الكهربائيِّ، ويكونُ شكلُ هذا المجالِ دائريًّا حولَ السلكِ.
- المجالُ المغناطيسيُّ الناتجُ عن ملفٍّ لولبيٍّ أو ملفٍّ دائري يشبهُ المجالَ المغناطيسيَّ لمغناطيسٍ دائمٍ.

القسم 5-3 القوَّةُ المغناطيسيَّةُ

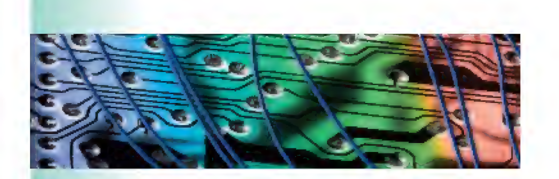
- يمكنُ تحديدُ اتِّجاهِ القوَّةِ المؤثِّرةِ في شحنةٍ موجبةٍ تتحرَّكُ في مجالٍ مغناطيسيٍّ، باستعمالِ قاعدةِ اليدِ اليُمنى.
- السلكُ الناقلُ لتيّارٍ، والموضوعُ في منطقةِ تأثيرِ مجالٍ مغناطيسيٍّ، يتعرَّضُ لقوَّةٍ مغناطيسيَّةٍ. يمكنُ تحديدُ اتِّجاهِ القوَّةِ المغناطيسيَّةِ على السلكِ باستعمالِ قاعدةِ اليدِ اليُمنى.
- يؤثِّرُ سلكانِ متوازيانِ وناقلانِ للتيّارِ أحدُهما في الآخرِ بقوَّتَيْنِ متساويتَيْنِ في المقدارِ ومتعاكستَيْنِ في الاتِّجاهِ. إذا كانَ التيّاران في الاتِّجاهِ نفسِه، فإن السلكَيْن يتجاذبان. لكن إذا كانَ التيّاران متعاكسَيْن فإن السلكَيْن يتنافران.

رموزٌ بيانيَّةٌ

متَّجهُ مجالٍ مغناطيسيٍّ	↑
مجالٌ مغناطيسيٌّ إلى داخلِ الصفحةِ	✖
مجالٌ مغناطيسيٌّ إلى خارجِ الصفحةِ	●

رموزُ المتغيِّراتِ

الكمّيَّة	الرمز	الوحدة	وحداتٌ مكافئةٌ
المجالُ المغناطيسيُّ	$\vec{B}$	T (تسلا)	$\frac{N}{A\cdot m} = \frac{N}{C\cdot m/s}$
القوَّةُ المغناطيسيَّةُ	$\vec{F}_{\text{المغناطيسيَّة}}$	N (نيوتن)	$\frac{kg\cdot m}{s^2}$
طولُ الموصِّلِ في المجال	l	m (متر)	







المجالاتُ المغناطيسيَّةُ

أسئلةُ مراجعة

1. ما أقلُّ عددٍ من الأقطابِ المغناطيسيَّةِ لمغناطيس؟

2. عندَما تقسمُ مغناطيسًا إلى قسمَيْن، كم يكونُ عددُ أقطابِ كلِّ قسمٍ؟

أسئلةٌ حولَ المفاهيم

3. لديكَ قضيبانِ حديدّيانِ ولَفَّةٌ من الخيطِ. أحدُ القضيبَيْن الحديديَّيْن ممغنطٌ، والآخرُ غيرُ ممغنطٍ. كيفَ تحدِّدُ أيَّ القضيبَيْن هو الممغنطُ؟

4. لماذا يجذبُ مغناطيسٌ قويٌّ جدًّا قطبَيْ مغناطيسٍ ضعيفٍ؟

المغناطيسيَّةُ الناتجةُ عن الكهرباءِ

أسئلةُ مراجعة

5. وُضِعَ سلكٌ ينقلُ تيّارًا، بحيثُ تتدفَّقُ الإلكتروناتُ في أحدِ أجزائِه من الشرقِ إلى الغربِ. إذا وضعَتَ بوصلةً فوقَ هذا الجزءِ من السلكِ، ففي أيِّ اتِّجاهٍ تنحرفُ؟ (ملاحظةٌ: تذكَّر أن التيارَ الكهربائيَّ يُعرَّفُ في اتِّجاهِ سيرِ الشحناتِ الموجبةِ.)

6. ما العواملُ التي تعتمدُ عليها شدَّةُ المجالِ المغناطيسيِّ في ملفٍّ لولبيٍّ؟

أسئلةٌ حولَ المفاهيم

7. يُعلَّقُ ملفٌّ لولبيٌّ طرفاهُ A و B بخيطٍ، بحيثُ يُمكنُ الملفُّ الدورانَ في مستوًى أفقيٍّ. يمرُّ تيارٌ كهربائيٌّ في الملفِّ، بحيث تدورُ الإلكتروناتُ في اتِّجاهِ دورانِ عقاربِ الساعةِ. إذا نظرْنا من الطرفِ A باتِّجاهِ الطرفِ B، فكيفَ يصطفُّ الملفُّ في المجالِ المغناطيسيِّ للأرضِ؟

8. هل يمكنُ وضعُ لفَّةٍ دائريةٍ تنقلُ تيّارًا في مجالٍ مغناطيسيٍّ منتظمٍ، بحيث لا تتعرَّضُ اللفَّةُ لأيِّ دورانٍ؟

9. إذا عُلِّقَ ملفٌّ لولبيٌّ بخيطٍ، بحيثُ يمكنُه الدورانُ بحريَّةٍ، فهل يمكنُ استعمالُ هذا الملفِّ كبوصلةٍ، عندَ مرورِ التيّارِ به؟ هل يمكنُ استعمالُه لهذا الغرضِ إذا مرَّ فيه تيّارٌ متناوبٌ؟

القوَّةُ المغناطيسيَّةُ

أسئلةُ مراجعة

10. أُطلقَ جُسَيمانِ مشحونانِ في منطقةٍ فيها مجالٌ مغناطيسيٌّ عموديٌّ على سرعتَيْهما. إذا انحرفَ الجسيمانُ في اتِّجاهَيْن متعاكسَيْن، فما الذي تستنتجُه بشأنِهما؟

11. افترضْ أن إلكترونًا يلاحقُ بروتونًا إلى أعلى هذه الصفحةِ، حيث يُطبَّقُ مجالٌ مغناطيسيٌّ بشكلٍ مفاجئٍ إلى داخلِ الصفحةِ. ما الذي يحدثُ للجسيمَيْن؟

12. لماذا تشوَّشُ صورةُ الشاشةِ التلفزيونيَّةِ عندَ تقريبِ مغناطيسٍ من الشاشةِ؟

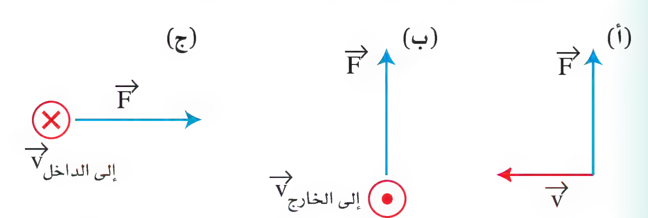
13. يدخلُ بروتونٌ يتحرَّكُ أفقيًّا منطقةً فيها مجالٌ مغناطيسيٌّ منتظمٌ، وعموديٌّ على سرعةِ البروتونِ، كما هو موضَّحٌ في الشكلِ. صِفْ حركةَ البروتونِ داخلَ المجالِ. إذا استبدلَ البروتونُ بإلكترونٍ كيفَ يتابعُ سيرَه داخلَ المجالِ؟

14. وضِّحْ لماذا يتنافرُ سلكانِ متوازيانِ عندَما يمرُّ فيهما تيّارانِ في اتِّجاهَيْن متعاكسَيْن.

15. هل يمكنُ لمجالٍ مغناطيسيٍّ أن يبدأَ بتحريكِ إلكترونٍ ساكنٍ؟ علِّلْ إجابتَك.

16. في لحظةٍ معيَّنةٍ، ينطلقُ بروتونٌ باتِّجاهِ محورِ x الموجبِ، في منطقةٍ فيها مجالٌ مغناطيسيٌّ باتِّجاهِ محورِ z السالبِ. ما اتِّجاهُ القوةِ المغناطيسيَّةِ الناتجةِ؟ هل يتابعُ البروتونُ سيرَه على محورِ x الموجبِ؟ علِّلْ إجابتَك.

17. استعملْ، في كلٍّ من الحالاتِ أدناه، اتِّجاهَ حركةِ جُسيمٍ مشحونٍ بشحنةٍ موجبةٍ، واتِّجاهَ القوّةِ المغناطيسيَّةِ الناتجةِ عليه، لتحديدِ اتِّجاهِ المجالِ المغناطيسيِّ.



أسئلةٌ حولَ المفاهيم

18. قُذفَ سيلٌ من الإلكتروناتِ أفقيًّا إلى اليمينِ. وُضع سلكٌ مستقيمٌ ينقلُ تيّارًا فوقَ الإلكتروناتِ، وبشكلٍ موازٍ لحركتِها.

أ. ما التأثيرُ في سيلِ الإلكتروناتِ، إذا انتقلَ التيّارُ داخلَ السلكِ من اليسارِ إلى اليمينِ؟

ب. ما التأثيرُ في الإلكتروناتِ إذا انعكسَ اتِّجاهُ التيّارِ؟

19. إذا استُبدلَ بالسلكِ في السؤالِ 18 مغناطيسٌ اتِّجاهُ مجالِه المغناطيسيِّ إلى أسفلَ، فما التأثيرُ في سيلِ الإلكتروناتِ؟

20. يُلفُّ سلكانِ ينقلانِ تيّارَيْنِ متعاكسَيْنِ أحدُهما على الآخرِ، عندَ صنعِ دائرةٍ كهربائيَّةٍ. لماذا يؤدّي ذلك إلى التقليلِ من أيِّ مجالٍ مغناطيسيٍّ غيرِ مرغوبٍ فيه؟

مسائلُ تطبيقيَّة

21. يسيرُ بروتونٌ نحوَ الشرقِ في مستوى الاستواءِ المغناطيسيِّ للأرضِ، حيثُ يتَّجهُ المجالُ المغناطيسيُّ للأرضِ نحوَ الشمالِ ويبلغُ 5.0×10^{-5} T. بأيِّ سرعةٍ يجبُ أن يسيرَ البروتونُ، بحيثُ تُعادلُ القوةُ المغناطيسيَّةُ قوةَ الجاذبيَّةِ على البروتونِ؟

22. قضيبٌ نحاسيٌّ رقيقٌ طولُه 1.00 m، وكتلتُه 50.0 g، وضعَ في مجالٍ مغناطيسيٍّ منتظمٍ. يؤدّي مرورُ تيّارٍ شدَّتُه 0.245 A في القضيبِ، إلى اتّزانِه في المجالِ المغناطيسيِّ. ما شدَّةُ المجالِ المغناطيسيِّ؟

23. نريدُ استعمالَ أميِّترٍ مقاومتُه الداخلية $5\,\Omega$ لقياسِ تيّاراتٍ كهربائيَّةٍ تصلُ شدَّتُها إلى 10 A، إلاّ أن الأميِّترَ يستطيعُ قياسَ تيّاراتٍ بين 0 و 1 A. ما مقاومةُ التحويلةِ التي يجبُ توصيلُها على التوازي مع الأميِّترِ لتحقيقِ ذلك؟

مراجعةٌ عامَّة

تذكَّرْ، أنَّ شحنةَ البروتونِ هي 1.60×10^{-19} C وكتلتَه 1.67×10^{-27} kg.

24. يتحرَّكُ بروتونٌ بسرعةٍ أفقيَّةٍ مقدارُها 2.50×10^{6} m/s وبشكلٍ عموديٍّ على مجالٍ مغناطيسيٍّ.

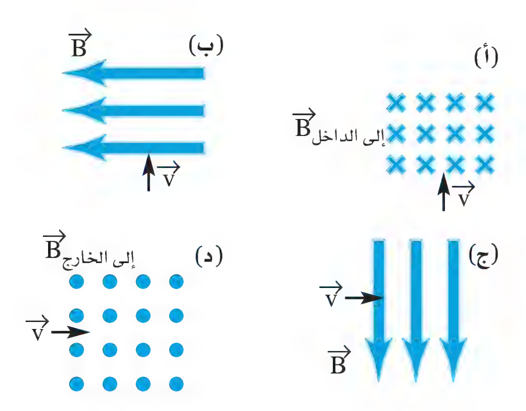
أ. ما شدَّةُ المجالِ المغناطيسيِّ المطلوبةُ لمعادلةِ وزنِ البروتونِ تمامًا، وإبقائِه في حركتِه الأفقيَّةِ؟

ب. هل يكونُ اتِّجاهُ المجالِ المغناطيسيِّ أفقيًّا أم رأسيًّا؟

25. A و B سلكانِ طويلانِ ومتوازيانِ، بينَهما مسافةُ 1 m يحملانِ تيّارَيْنِ في اتِّجاهَيْنِ متضادَّيْنِ. إذا كانَ تيّارُ A يساوي ثلثَ تيّارِ B $(I_A = \frac{1}{3} I_B)$، فحدِّدْ موقعَ النقطةِ على الخطِّ العموديِّ على السلكَيْنِ حيثُ تكونُ محصِّلةُ المجالِ المغناطيسيِّ عندَها تساوي صفرًا.

26. ملفّانِ دائريّانِ لهما المركزُ نفسُه ويقعانِ في مستوى واحدٍ. إذا كانَ الملفُّ الداخليُّ يحوي 120 لفَّةً، ونصفُ قطرِه 0.012 m، ويحملُ تيّارًا شدَّتُه 6 A، والملفُّ الخارجيُّ يحوي 150 لفَّةً، ونصفُ قطرِه 0.017 m، فما شدَّةُ تيّارِ الملفِّ الخارجيِّ واتِّجاهُه، بحيثُ تكونُ محصِّلةُ المجالِ المغناطيسيِّ في المركزِ تساوي صفرًا؟

27. حدِّدِ اتِّجاهَ القوَّةِ على بروتونٍ يتحرَّكُ في مجالٍ مغناطيسيٍّ في الحالاتِ الأربعِ التاليةِ.



28. يتحرَّكُ بروتونٌ بسرعةِ 2.0×10^7 m/s وبزاويةٍ عموديَّةٍ على مجالٍ مغناطيسيٍّ شدَّتُه 0.10 T. احسبْ مقدارَ تعجيلِ البروتونِ.

29. يتحرَّكُ بروتونٌ بشكلٍ عموديٍّ على مجالٍ مغناطيسيٍّ منتظمٍ $\vec{B}$، بسرعةٍ مقدارُها 1.0×10^7 m/s ويكتسبُ تعجيلاً مقدارُه 2.0×10^{13} m/s^2 في اتِّجاهِ x الموجبِ، عندَما تكونُ سرعتُه في اتِّجاه z الموجبِ. احسُبْ مقدارَ المجالِ المغناطيسيِّ واتِّجاهَهُ.

30. يتحرَّكُ بروتونٌ بسرعةِ 3.0×10^6 m/s بزاويةِ 37° غربَ الشمالِ في منطقةِ مجالٍ مغناطيسيٍّ مقدارُه 0.30 T، ويتَّجهُ نحوَ الشمالِ. احسُبْ ما يلي:

أ. مقدارَ القوَّةِ المغناطيسيَّةِ على البروتونِ.

ب. اتِّجاهَ القوَّةِ المغناطيسيَّةِ على البروتونِ.

ج. تعجيلَ البروتونِ خلالَ تحرُّكِه داخلَ المجالِ.

(ملاحظةٌ: القوَّةُ المغناطيسيَّةُ التي تؤثِّرُ في البروتونِ في المجالِ المغناطيسيِّ تتناسبُ مع مركَّبةِ سرعةِ البروتونِ العموديَّةِ على اتِّجاهِ المجالِ المغناطيسيِّ.)

31. سلكٌ ينقلُ تيّارًا شدَّتُه $I = 15$ A على محورِ x الموجبِ، بشكلٍ عموديٍّ على مجالٍ مغناطيسيٍّ منتظمٍ، يتعرَّضُ لقوَّةٍ مغناطيسيَّةٍ في وحدةِ الطولِ، مقدارُها 0.12 N/m في اتِّجاهِ محورِ y السالبِ. احسُبْ مقدارَ المجالِ المغناطيسيِّ واتِّجاهَهُ في منطقةِ مرورِ التيّارِ الكهربائيِّ.

32. يتعرَّضُ بروتونٌ لقوَّةٍ مغناطيسيَّةٍ مقدارُها 4.5×10^{-21} N عندَ تحرُّكِهِ بشكلٍ عموديٍّ على مجالٍ مغناطيسيٍّ شدَّتُهُ 3.5 mT. احسُبْ ما يلي:

أ. سرعةَ البروتونِ.

ب. الطاقةَ الحركيةِ للبروتونِ.

33. أيونٌ كتلتُه 6.68×10^{-27} kg مشحونٌ بشحنةٍ موجبةٍ بفقدِ إلكترونٍ واحدٍ، يتحرَّكُ في اتِّجاهِ عقاربِ الساعةِ، بسرعةٍ مقدارُها 1.00×10^4 m/s. تكونُ حركةُ الأيونِ على مسارٍ دائريٍّ نصفُ قطرِه 3.00 cm. احسُبْ مقدارَ واتِّجاهَ المجالِ المغناطيسيِّ المنتظمِ الذي يتحرَّكُ الأيونُ بداخلِه.

(ملاحظةٌ: القوَّةُ المغناطيسيَّةُ التي تؤثِّرُ في الأيونِ الموجبِ هي قوةٌ مركزيَّةٌ، بينَما سرعتُهُ سرعةٌ مماسيَّةٌ.)

34. يقيس الفولتميتر ذو الملفّ الدوّار فرقَيْ جهدَيْن 0 و 5 V.

أ. إذا كانت مقاومة الفولتميتر 500 Ω، احسب شدة التيّار المارّ إذا كانت قراءة الفولتميتر 5V.

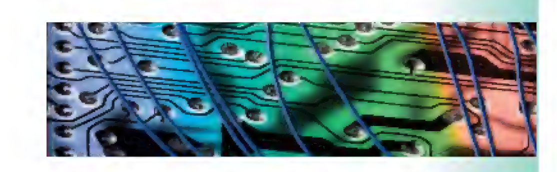
ب. نريد استعمال الفولتميتر لقياس فروق جهد أعلى من 5 V. ما مقدار المقاومة التي يجب توصيلها على التوالي مع الفولتميتر لقياس فرق جهد كلّي قيمته 30 V؟ 150 V؟

التقاريرُ والمشاريع

1. خلالَ رحلةٍ ميدانيَّةٍ لصفِّك، وجدْتَ قطعةً معدنيَّةً مُستديرةً تجذبُ قطعًا صغيرةً من الحديدِ. صمِّمْ طريقةً لتتحقَّقَ من أن هذا الجسمَ مغناطيسيٌّ، وحدِّدْ قطبيَّتَه إذا كانَ كذلك. صفْ محدوديَّةَ طريقتِك. أيُّ الموادِّ تلزمُك لذلك؟ كيف تصلُ إلى نتائجِك؟ اذكرْ جميعَ النتائجِ التي يمكنُكَ الحصولُ عليها والاستنتاجاتِ التي يمكنُكَ الوصولُ إليها من كلِّ نتيجةٍ.

2. احصلْ على أجراسٍ وأجهزةِ هاتفٍ ومكبِّراتِ صوتٍ، ومحرِّكاتِ أدواتٍ منزليَّةٍ، من أجلِ فتحِها وتعرُّفِها. ميِّزِ المركَّباتِ الميكانيكيَّةَ والكهرومغناطيسيَّةَ، وصفْ توصيلَها بعضِها ببعضٍ. كيف تُنتجُ هذه المركَّباتُ مجالاً مغناطيسيًّا؟ اعملْ في مجموعاتٍ متعاونةٍ لوصفِ وترتيبِ نتائجِكَ حولَ أجهزةٍ مختلفةٍ وتقديمِها في معرضٍ بعنوانِ «عالمُ الأجهزةِ الكهرومغناطيسيَّةِ».

3. في بعضِ الأقمارِ الاصطناعيَّةِ، تُستبدلُ بملفّاتِ العزومِ أجهزةٌ تُسمَّى قضبانَ العزومِ. في قضبانِ العزومِ، تُدخَلُ مادةٌ مغناطيسيَّةٌ حديديَّةٌ داخلَ الملفِّ. لمَ يكونُ لقضيبِ العزمِ مجالٌ مغناطيسيٌّ أكبرُ من مجالِ ملفِّ العزمِ؟



تقويم الفصل 5

اختيارٌ من متعدِّد

1. كيفَ يزيدُ مقدارُ المجالِ المغناطيسيِّ داخلَ ملفٍّ لولبيٍّ؟
- أ. بزيادةِ عددِ اللفّاتِ في وحدةِ الطولِ.
- ب. بزيادةِ التيّارِ.
- ج. بإدخالِ قضيبٍ حديديٍّ داخلَ الملف.
- د. كلُّ ما وردَ أعلاه.

استعملِ الشكلَ أدناه للإجابةِ عن السؤالَيْن 2 و 3.

× × × × ×
× × × × ×
× × × × × $\vec{B}$ إلى الداخل
× × × × ×
× × × × ×
$\vec{v}$

2. كيفَ يتحرَّكُ الإلكترونَ عندَ دخولِه منطقةَ المجالِ المغناطيسيِّ؟
- أ. ينحرفُ نحوَ اليمينِ، ثم يتابعُ في خطٍّ مستقيمٍ، باتّجاهِ اليمينِ.
- ب. ينحرفُ نحوَ اليسارِ ثم يتابعُ في خطٍّ مستقيمٍ باتّجاهِ اليسارِ.
- ج. يتحرَّكُ على مسارٍ نصفِ دائريٍّ باتّجاهِ دورانِ عقاربِ الساعةِ.
- د. يتحرَّكُ على مسارٍ نصفِ دائريٍّ معاكسٍ لدورانِ عقاربِ الساعةِ.

3. كم يبلغُ مقدارُ القوَّةِ المغناطيسيَّةِ على الإلكترونِ لدى دخولِه منطقةَ المجالِ المغناطيسيِّ؟
- أ. qvB
- ب. $-qvB$
- ج. $\frac{q}{vB}$
- د. BIl

4. يتحرَّكُ جسيمٌ ألفا $(q = 3.2 \times 10^{-19}\ \text{C})$ بسرعةِ $2.5 \times 10^{6}\ \text{m/s}$ عموديًّا على مجالٍ مغناطيسيٍّ مقدارُه $2.0 \times 10^{-4}\ \text{T}$. ما مقدارُ القوَّةِ المغناطيسيَّةِ المؤثِّرةِ في الجسيمِ؟
- أ. $1.6 \times 10^{-16}\ \text{N}$
- ب. $-1.6 \times 10^{-16}\ \text{N}$
- ج. $4.0 \times 10^{-9}\ \text{N}$
- د. صفر

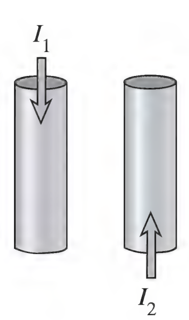
استعملِ النصَّ التالي للإجابةِ عن السؤالَيْن 5 و 6.

ينقلُ سلكٌ طولُه 25 cm تيّارًا شدَّتُه 12 A من الشرقِ إلى الغربِ. مقدارُ المجالِ المغناطيسيِّ للأرضِ عندَ منطقةِ السلكِ $4.8 \times 10^{-5}\ \text{T}$، واتّجاهُه من الجنوبِ إلى الشمالِ.

5. ما مقدارُ القوَّةِ المغناطيسيَّةِ المؤثِّرةِ في السلكِ؟
- أ. $2.3 \times 10^{-5}\ \text{N}$
- ب. $1.4 \times 10^{-4}\ \text{N}$
- ج. $2.3 \times 10^{-3}\ \text{N}$
- د. $1.4 \times 10^{-2}\ \text{N}$

6. ما اتّجاهُ القوَّةِ المغناطيسيَّةِ المؤثِّرةِ في السلكِ؟
- أ. الشمال.
- ب. الجنوب.
- ج. إلى أعلى، بعيدًا عن الأرضِ.
- د. إلى أسفلَ، نحوَ الأرضِ.

استعملِ الشكلَ أدناه للإجابةِ عن الأسئلةِ 7-9.



السلكُ 1 ينقلُ تيّارًا I_1 وينتجُ مجالاً مغناطيسيًّا B_1.
السلكُ 2 ينقلُ تيّارًا I_2 وينتجُ مجالاً مغناطيسيًّا B_2.

7. ما اتّجاهُ المجالِ المغناطيسيِّ B_1 عندَ نقاطِ السلكِ 2؟
- أ. إلى اليسارِ.
- ب. إلى اليمينِ.
- ج. إلى داخلِ الصفحةِ.
- د. إلى خارجِ الصفحةِ.

8. ما اتِّجاهُ القوَّةِ المؤثِّرةِ في السلكِ 2، نتيجةً للمجالِ B_1؟
أ. إلى اليسارِ.
ب. إلى اليمينِ.
ج. إلى داخلِ الصفحةِ.
د. إلى خارجِ الصفحةِ.

9. ما مقدارُ القوَّةِ المغناطيسيَّةِ المؤثِّرةِ في السلكِ 2؟
أ. $B_1 I_1 l_1$
ب. $B_1 I_1 l_2$
ج. $B_1 I_2 l_2$
د. $B_2 I_2 l_2$

أسئلةٌ ذاتُ إجابةٍ قصيرةٍ

10. صفْ كيفَ تُستعمل قاعدةُ اليدِ اليُمنى لتحديدِ اتِّجاهِ المجالِ المغناطيسيِّ حولَ سلكٍ ناقلٍ للتيّارِ.

11. ارسُمْ شكلاً يظهرُ مسارَ شحنةٍ موجبةٍ تتحرَّكُ في مستوى ورقةٍ، في منطقةِ مجالٍ مغناطيسيٍّ يتَّجهُ إلى خارجِ صفحةِ الورقةِ.

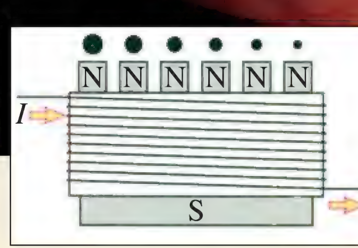
أسئلةٌ ذاتُ إجابةٍ مطوَّلةٍ

12. يتحرَّكُ بروتونٌ ($m = 1.7 \times 10^{-27}$ kg، $q = 1.6 \times 10^{-19}$ C) في مجالٍ مغناطيسيٍّ منتظمٍ مقدارُه 0.25 T، على مسارٍ دائريٍّ في اتِّجاهِ عقاربِ الساعةِ، بسرعةٍ مماسّيَّةٍ شدَّتُها 2.8×10^5 m/s.
أ. ما اتِّجاهُ المجالِ المغناطيسيِّ؟ أوضحْ طريقةَ الحصولِ على ذلك.
ب. ما نصفُ قطرِ المسارِ الدائريِّ؟



الفصـــــل 6

الحثُّ الكهرومغناطيسيُّ
Electromagnetic Induction



تُغيِّرُ ذبذباتُ أوتارِ الكيتارِ الكهربائيِّ المجالَ المغناطيسيَّ قربَ ملفٍّ سلكيٍّ يُسمّى اللاقط. وهذا بدورِهِ يحثُّ تيّارًا كهربائيًّا في الملفِّ، وهو ما يضخِّمُ لإنتاجِ صوتِ الكيتارِ الكهربائيِّ المعروفِ.



ما يُتوقَّعُ تحقيقُهُ

ستتعلَّمُ في هذا الفصلِ كيف يؤدّي الحثُّ الكهرومغناطيسيُّ إلى توليدِ التيّاراتِ المتناوبة ومعايرتِها. سوف تستكشف أيضًا الموجات الكهرومغناطيسيَّة والطيف الكهرومغناطيسيّ.

ما أهمّيّتُه

للكيتاراتِ الكهربائيَّةِ أنواعٌ متعدِّدةٌ ومختلفةٌ من اللواقط، لكنَّها كلَّها تولِّدُ تيّارًا كهربائيًّا بوساطةِ عمليةِ الحثِّ. إن فهمَ الحثِّ الكهرومغناطيسيِّ أمرٌ ضروريٌّ من أجلِ تصميمٍ جيِّدٍ للكيتارِ الكهربائيِّ.

محتوى الفصل 6



القسم 1-6 الكهربائيَّةُ الناتجةُ عن المغناطيسيَّةِ

Electricity from Magnetism

1-6 أهداف القسم

- يستنتجُ أن الحركةَ النسبيَّةَ بين موصِّلٍ ومجالٍ مغناطيسيٍّ تحثُّ قوَّةً دافعةً مغناطيسيَّةً في الموصِّل.
- يصفُ كيفَ يؤثِّرُ التغيُّرُ في عددِ خطوطِ المجالِ المغناطيسيِّ، من خلالِ حلقةٍ دائريَّةٍ في مقدارِ التيَّارِ الكهربائيِّ المُحتثِّ واتِّجاهِه.
- يطبِّقُ قانونَي لنز وفاراداي للحثِّ، لحلِّ مسائلَ تتعلَّقُ بالقوَّةِ الدافعةِ الكهربائيَّةِ المُحتثَّةِ، والتيَّارِ المُحتَثِّ.

الحثُّ الكهرومغناطيسيُّ

عمليَّةُ إنتاجِ تيَّارٍ كهربائيٍّ في موصِّلٍ في دائرةٍ مغلقةٍ، بتغييرِ التدفُّقِ المغناطيسيِّ خلالَه.

التيَّار الحثي

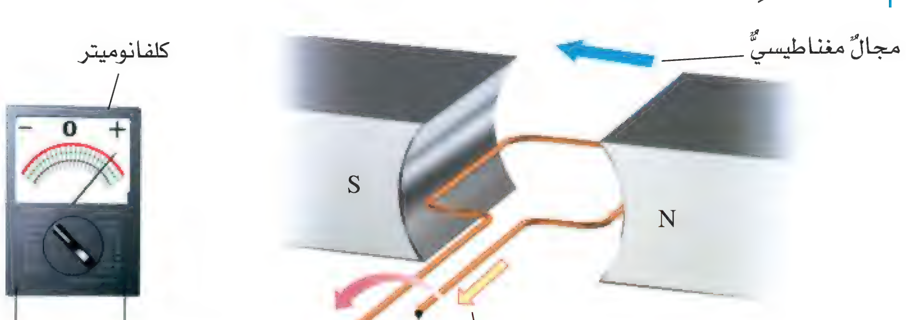
تيَّار كهربائي متولِّد في دائرة كهربائية مغلقة بسبب حركتها النسبية داخل المجال المغناطيسي.

الحثُّ الكهرومغناطيسيُّ

خلالَ دراستِك للدوائرِ الكهربائيَّةِ، طُرِحَتْ إمكانيَّةُ الحصولِ على تيّارٍ كهربائيٍّ باستعمالِ ملفٍّ فقط، ومن دونِ أيِّ بطّاريَّةٍ. إن كلَّ الدوائرِ الكهربائيَّةِ التي دُرِسَتْ إلى الآن، كانَتْ تشتملُ على بطّاريةٍ أو مصدرِ طاقةٍ كهربائيَّةٍ، من أجلِ توليدِ فرقِ جُهدٍ في الدائرةِ. المجالُ الكهربائيُّ الناتجُ عن فرقِ الجُهدِ يؤدّي إلى تحريكِ الشحناتِ في الدائرةِ لتوليدِ تيّارٍ كهربائيٍّ.

يمكنُ أيضًا حثُّ تيّارٍ كهربائيٍّ في دائرةٍ من دونِ استعمالِ بطّاريَّةٍ أو مصدرِ طاقةٍ كهربائيَّةٍ. علمْتَ أن التيّارَ الكهربائيَّ في دائرةٍ هو مصدرٌ للمجالِ المغناطيسيِّ. والعكسُ صحيحٌ، حيثُ ينتجُ تيّارٌ كهربائيٌّ عندما تتحرَّكُ دائرةٌ مغلقةٌ بالنسبةِ إلى مجالٍ مغناطيسيٍّ، كما هو موضَّحٌ في **الشكل 1-6**. إن عمليَّةَ حثِّ التيّارِ في دائرةٍ، بوساطةِ تغييرِ المجالِ المغناطيسيِّ المارِّ من خلالِها، تُسمّى **الحثَّ الكهرومغناطيسيَّ** electromagnetic induction.

إذا كان لديكَ دائرةٌ مغلقةٌ مؤلَّفةٌ فقطْ من ملفٍّ يقعُ على مقربةٍ من مغناطيس، وما من بطّاريَّةٍ في الدائرةِ تؤدّي إلى تيّار، وإذا لم يتحرَّكْ أيٌّ من المغناطيسِ أو الملفِّ أحدُهما بالنسبةِ إلى الآخرِ، لا ينشأُ أيُّ تيّارٍ في الدائرةِ. لكن، إذا تحرَّكَ الملفُّ باتِّجاهِ المغناطيسِ أو بعيدًا عنه، أو تحرَّكَ المغناطيسُ باتِّجاهِ الملفِّ أو بعيدًا عنه، فسوفَ يُحتثُّ تيّارٌ في الدائرةِ. وما دامَتْ هناك حركةٌ نسبيَّةٌ بين المغناطيسِ والملفِّ، فإن ذلك يؤدّي إلى تيّارٍ في الدائرةِ يسمى **التيار الحثي** induced current .



الشكل 1-6
عندما تقطعُ لفَّةُ الدائرةِ خطوطَ المجالِ المغناطيسي، يُحتَثُّ تيّارٌ كهربائيٌّ في الدائرة، كما تدلُّ على ذلك حركةُ مؤشِّرِ الكلفانوميترِ.

القوّةُ الدافعةُ الكهربائيَّةُ (ε) المحتثَّةُ في موصل مستقيم

قد يبدو غريبًا إمكانُ حثِّ قوّةٍ دافعةٍ كهربائيَّةٍ (ε) وتيّارٍ كهربائيٍّ، من دونِ بطّاريَّةٍ أو مصدرِ طاقةٍ كهربائيَّةٍ. مرَّ في الفصلِ السابقِ أن الشحنةَ المتحرِّكةَ تتعرَّضُ لانحرافٍ عندَ دخولِها في مجالٍ مغناطيسيٍّ. يمكنُ استعمالُ مفهومِ هذا الانحرافِ، لتفسيرِ وجودِ ε في سلكٍ يتحرَّكُ في مجالٍ مغناطيسيٍّ.

افترضْ سلكًا موصِّلاً ab، يتمُّ تحريكُه في مجالٍ مغناطيسيٍّ، كما هو موضَّحٌ في **الشكل 6-2**. أنت تعلمُ عندَ دراسةِ المغناطيسيَّةِ، أن الجُسيماتِ المشحونةَ، المتحرِّكةَ بزاويةٍ معيَّنةٍ مع مجالٍ مغناطيسيٍّ، تتعرَّضُ لقوَّةٍ مغناطيسيَّةٍ. وفقًا لقاعدةِ كفِّ اليدِ اليُمنى، تكونُ هذه القوَّةُ عموديَّةً على كلٍّ من المجالِ المغناطيسيِّ وسرعةِ حركةِ الشحناتِ. وتكونُ هذه القوَّةُ على امتدادِ السلكِ إلى أسفلَ، بالنسبةِ إلى الشحناتِ الحُرَّةِ الموجبةِ، وإلى أعلى بالنسبةِ إلى الشحناتِ الحُرَّةِ السالبةِ. هذا التأثيرُ يكافئُ إحلالَ بطّاريَّةٍ لها فرقُ جُهدٍ أو ε بينَ طرفَيْها محلَّ قطعةِ السلكِ والمجالِ المغناطيسيِّ، كما هو موضَّحٌ في **الشكل 6-2**. يمكنُ المحافظةُ على هذهِ القوَّةِ الدافعةِ الكهربائيَّةِ مادامَ السلكُ يتحرَّكُ في المجالِ المغناطيسيِّ.

تعتمدُ قطبيَّةُ ε المحتثَّةُ على اتِّجاهِ حركةِ السلكِ في المجالِ المغناطيسيِّ. مثلاً، إذا تحرَّكَ السلكُ في **الشكل 6-2** إلى اليمين، تتنبَّأُ قاعدةُ كفِّ اليدِ اليُمنى بانحرافِ الشحناتِ السالبةِ إلى أعلى السلكِ. لكن إذا تحرَّكَ السلكُ نحوَ اليسارِ، فإن الشحناتِ السالبةَ تنحرفُ إلى أسفلِ السلكِ. أما مقدارُ ε المحتثَّةِ فيعتمدُ على سرعةِ حركةِ السلكِ v في المجالِ المغناطيسيِّ، وعلى طولِ السلكِ ℓ الواقعِ في منطقةِ المجالِ، وشدَّةِ المجالِ المغناطيسيِّ B. وتحسبُ (ε) من العلاقةِ:

$$\varepsilon = B\ell v$$

$\vec{B}$ إلى خارجِ الصفحةِ

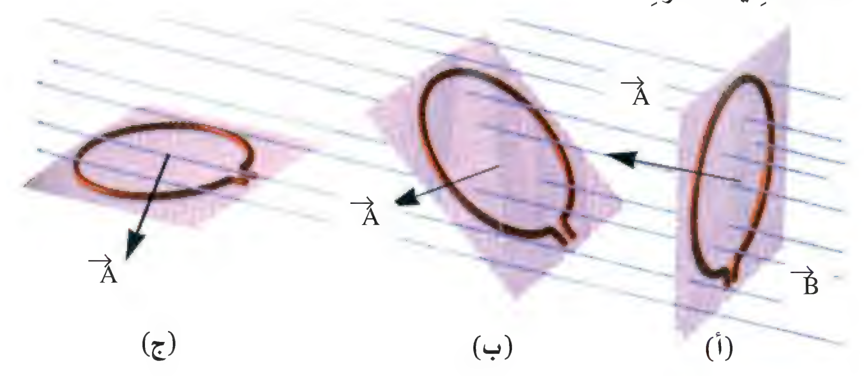
الشكل 6-2
فصلُ الشحناتِ السالبةِ عن الشحناتِ الموجبةِ بوساطةِ مجالٍ مغناطيسيٍّ، يولِّدُ فرقَ جُهدٍ (ε) بينَ طرفَيِ الموصِّلِ.

تأثيرُ الزاويةِ بينَ المجالِ والموصِّلِ على التيّارِ المحتثِّ

إحدى طرائقِ حثِّ ε في حلقةِ سلكٍ مغلقةٍ، تحريكُها أو تحريكُ جزءٍ منها إلى داخلِ مجالٍ مغناطيسيٍّ منتظمٍ، أو إلى خارجِه. لا تُحثُّ أيُّ ε إذا كانَتِ الحلقةُ ساكنةً والمجالُ المغناطيسيُّ ثابتًا.

يعتمدُ مقدارُ ε المُحتثَّةِ والتيّارِ المُحتثِّ اعتمادًا جُزئيًّا على اتِّجاهِ الحلقةِ في المجالِ المغناطيسيِّ، كما هو موضَّحٌ في **الشكل 6-3**. يكونُ التيّارُ المُحتثُّ أقصى ما يمكنُ عندَما يكونُ مستوى الحلقةِ عموديًّا على المجالِ المغناطيسيِّ، كما في **الشكل 6-3** (أ). ويكونُ أقلَّ إذا كانَ مستوى الحلقةِ مائلاً بالنسبةِ إلى المجالِ، كما في **الشكل 6-3** (ب). ويكونُ صفرًا إذا كانَ مستوى الحلقةِ موازيًا تمامًا لاتِّجاهِ المجالِ، كما في **الشكل 6-3** (ج).

يمكنُ توضيحُ الدورِ الذي يؤثِّرُ به اتِّجاهُ الحلقةِ في حثِّ التيّارِ الكهربائيِّ، بوساطةِ القوَّةِ التي يؤثِّرُ بها المجالُ المغناطيسيُّ على شحناتِ الحلقةِ المتحرِّكةِ. وحدَها مركَّبةُ المجالِ المغناطيسيِّ العموديَّةُ على كلٍّ من الحلقةِ واتِّجاهِ سيرِها، تؤثِّرُ بقوَّةٍ مغناطيسيَّةٍ على شحناتِ الحلقةِ. إذا حرَّكْنا مستوى الحلقةِ بشكلٍ موازٍ للمجالِ المغناطيسيِّ، لن تكونَ هناك مركَّبةٌ للمجالِ عموديَّةٌ على مستوى الحلقةِ؛ وبالتالي لن تُنتجَ ε لتحريكِ الشحناتِ في الدائرةِ.



الشكل 6-3
تتحرَّكُ حلقاتُ السلكِ الثلاثُ إلى خارجِ مجالٍ مغناطيسيٍّ ثابت. تكونُ ε المحتثَّةُ والتيّارُ المحتثُّ أقصى ما يمكنُ، عندَما يكونُ مستوى الحلقةِ عموديًّا على المجالِ المغناطيسيِّ (أ). وتقلُّ قيمتُها عندما يكونُ مستوى الحلقةِ مائلاً (ب). وتصبحُ صفرًا إذا كانَ مستوى الحلقةِ موازيًا لخطوطِ المجالِ المغناطيسيِّ (ج).

تأثيرُ تغيُّر عددِ خطوطِ المجالِ المغناطيسيِّ على التيّار المحتثّ

ما أصبحَ معلومًا لديكَ، أن تحريكَ حلقةٍ إلى داخل مجالٍ مغناطيسيٍّ، أو إلى خارجِه، يمكنُ أن يحثَّ ε وتيّارًا كهربائيًّا في الحلقةِ. كما أن تغييرَ شكلِ الحلقةِ أو شدَّةِ المجالِ يحثُّ أيضًا ε في الحلقةِ.

إحدى الطرائق لتُعرفَ إمكانيَّةُ حثِّ تيّارٍ في موقفٍ ما، هي دراسةُ عددِ خطوطِ المجالِ المغناطيسيِّ التي تقطعُ الحلقةَ أثناءَ الحركةِ. فمثلاً، تحريكُ الحلقةِ إلى داخلِ المجالِ المغناطيسيِّ يؤدّي ببعضِ خطوطِ المجالِ إلى دخولِ مساحةِ الحلقةِ. كما أن تغييرَ شكلِ الحلقةِ أو دورانَها يغيِّرُ عددَ خطوطِ المجالِ التي تخترقُ الحلقةَ. ويجري ذلك أيضًا لو تغيَّرَت شدَّةُ المجالِ المغناطيسيِّ أو اتِّجاهُه. يلخِّصُ **الجدولُ 1-6** الطرائق الثلاثَ التي تؤدّي إلى تيّارٍ كهربائيٍّ مُحتَثٍّ.

خصائصُ التيّارِ المُحتثِّ

افترضْ أن قضيبًا مغناطيسيًّا قد دُفِعَ إلى داخلِ ملفٍّ سلكيٍّ. كلّما اقتربَ المغناطيسُ من الملفِّ ازدادَت شدَّةُ المجالِ المغناطيسيِّ داخلَ الملفِّ، ما يؤدّي إلى تيّارٍ مُحتَثٍّ في الدائرةِ. يُنتِجُ التيّارُ المُحتَثُّ بدورِه مجالاً مغناطيسيًّا خاصًّا به، يمكنُ معرفةُ اتِّجاهِه باستعمالِ قاعدةِ اليدِ اليُمنى. عندَ تطبيقِ هذه القاعدةِ في حالاتٍ متعدِّدةٍ، تلاحظُ أن اتِّجاهَ المجالِ المغناطيسيِّ المُحتَثِّ يعتمدُ على الطريقةِ التي يتغيَّرُ فيها المجالُ المطبَّقُ.

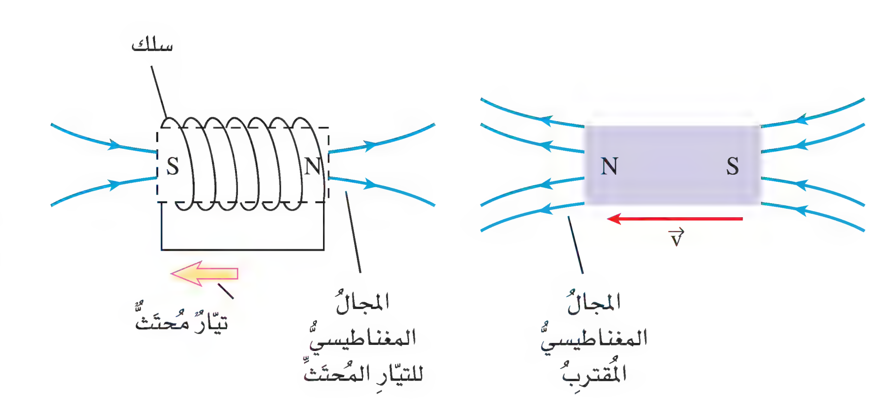
كلّما اقتربَ المغناطيسُ، تزدادُ شدَّةُ المجالِ المغناطيسيِّ الذي يخترقُ الملفَّ. يدورُ التيّارُ المُحتَثُّ في اتِّجاهٍ يؤدّي إلى إنتاجِ مجالٍ مغناطيسيٍّ يُعاكِسُ ازديادَ المجالِ المغناطيسيِّ الأساسيِّ. لذلك يكونُ اتِّجاهُ المجالِ المغناطيسيِّ المُحتَثِّ معاكسًا لاتِّجاهِ ازديادِ المجالِ المغناطيسيِّ الأساسيِّ.

هل تعلم؟

في العامِ 1996، حاولَ روّادُ الفضاءِ، في المركبةِ الفضائيَّةِ كولومبيا، استعمالَ سلكٍ موصلٍ طولُه 20.7 km لدراسةِ المجالِ المغناطيسيِّ للأرضِ في الفضاءِ. اقتضَت الخطَّةُ سحبَ السلكِ خلالَ المجالِ المغناطيسيِّ من أجلِ حثِّ قوَّةٍ دافعةٍ كهربائيَّةٍ. يتغيَّرُ مقدارُ ε طرديًّا مع شدَّةِ المجالِ المغناطيسيِّ. لسوءِ الحظِّ، انقطعَ السلكُ قبلَ مَدِّه بشكلٍ كاملٍ، فصُرِفَ النظرُ عن التجربةِ.

الجدول 1-6 طرائقُ حثِّ تيّارٍ كهربائيٍّ في دائرةٍ

الوصف	قبل	بعد
حلقةٌ تتحرَّكُ إلى داخلِ مجالٍ مغناطيسيٍّ أو إلى خارجِه (حلقةٌ متحرِّكةٌ أو مغناطيسٌ متحرِّكٌ)	$\vec{v}$	$\vec{v}$, $\vec{B}$, I
حلقةٌ تدورُ في مجالٍ مغناطيسيٍّ (الزاويةُ بين مساحةِ الحلقةِ والمجالِ المغناطيسيِّ تتغيَّرُ)	$\vec{B}$	$\vec{B}$, I
شدَّةُ المجالِ المغناطيسيِّ تتغيَّرُ أو اتِّجاهُه يتغيَّرُ، أو كلاهما يتغيَّران	$\vec{B}$	$\vec{B}$, I



الشكل 4-6

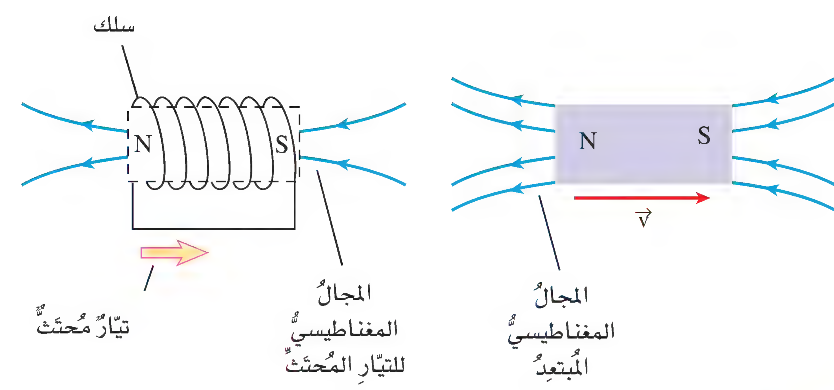
عندَما يتحرَّكُ قضيبٌ مغناطيسيٌّ باتِّجاهِ ملفٍّ، يكونُ المجالُ المغناطيسيُّ المُحثُّ معاكسًا لمجالِ القضيبِ المغناطيسيِّ المقتربِ.

يشبهُ المجالُ المغناطيسيُّ المُحثُّ مجالَ القضيبِ المغناطيسيِّ الموضَّحَ في **الشكل 4-6**. ينشأُ عن الملفِّ والمغناطيسِ المُقتربِ منه زوجٌ من القوى المتنافرةِ.

إذا حرَّكنا المغناطيسَ بعيدًا عن الملفِّ، تنقصُ شدَّةُ المجالِ الذي يخترقُ الملفَّ. ومرَّةً أخرى، يُنتِجُ التيّارُ المُحثُّ في الملفِّ مجالاً مغناطيسيًّا يُعاكسُ انخفاضَ شدَّةِ المجالِ الأساسيِّ المُبتعدِ. يعني ذلك أن المجالَ المغناطيسيَّ الناتجَ عن الملفِّ يكونُ في اتِّجاهِ المجالِ المُبتعِدِ.

يشبهُ المجالُ المغناطيسيُّ المحثَّ مجالَ القضيبِ المغناطيسيِّ الموضَّحِ في **الشكل 5-6**. في هذه الحالةِ، يجذبُ الملفُّ والمغناطيسُ أحدُهما الآخرَ.





الشكل 5-6

عندَما يتحرَّك قضيبٌ مغناطيسيٌّ بعيدًا عنِ الملفِّ، يكونُ المجالُ المغناطيسيُّ المُحثُّ مُشابهًا لمجالِ القضيبِ المغناطيسيِّ المبتعدِ.

الفيزياءُ والحياة

1. سقوط حرٌّ لمغناطيس أُسقطَ قضيبٌ مغناطيسيٌّ نحوَ الأرضِ، حيث توضعُ حلقةٌ كبيرةٌ من سلكٍ معدنيٍّ. يكونُ طولُ المغناطيس، وبالتالي اتِّجاهُ قطبَيْه، موازيًا لاتِّجاهِ حركتِه. بإهمالِ مقاومةِ الهواءِ، هل يسقطُ المغناطيسُ نحوَ الحلقةِ بتعجيلِ السقوطِ الحرِّ الثابتِ نفسِه؟ وضِّحْ إجابتَك.

2. الحثُّ في السوار افترضْ أن امرأةً تضعُ سوارًا مصنوعًا من حلقةٍ نحاسيَّةٍ غيرِ مقطوعةٍ، وافترضْ أنها مشَتْ بسرعةٍ في مجالٍ مغناطيسيٍّ قويٍّ، وهي تضعُ السوارَ. كيفَ ينبغي أن يكونَ اتِّجاهُ السوارِ بالنسبةِ إلى المجالِ المغناطيسيِّ، بغيةِ تجنُّبِ تيّارٍ محثٍ في السوارِ؟

تُسمّى القاعدةُ التي نحصلُ بوساطتِها على اتّجاهِ التيّارِ المُحتَثِّ قانونَ لنز، وتنصُّ على ما يلي:

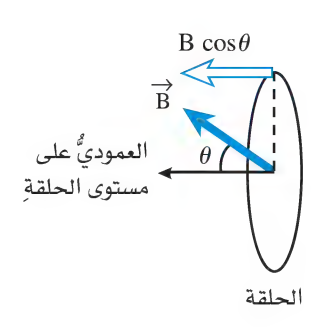
يكونُ اتّجاهُ المجالِ المغناطيسيِّ الناتجِ عن التيّارِ المُحتَثِّ معاكسًا للتغيُّرِ الذي أحدثَ التيّارَ.

لاحظْ أن مجالَ التيّارِ المُحتَثِّ لا يعاكسُ اتّجاهَ المجالِ المطبَّق، بل يُعاكسُ اتّجاهَ التغيُّرِ في هذا المجالِ. إذا تغيَّرَ المجالُ المطبَّقُ، فإن المجالَ المُحتَثَّ يحاولُ أن يبقيَ المجالَ الكلّيَّ ثابتًا.

قانونُ فاراداي للحثِّ ومقدارُ القوّةِ الدافعةِ الكهربائيّةِ المُحتَثّةِ

يمكّنُكَ قانونُ لنز من تحديدِ اتّجاهِ التيّارِ المُحتَثِّ في دائرة. إلا أن قانونَ لنز لا يُقدِّمُ أيَّ معلوماتٍ عن مقدارِ التيّارِ المُحتَثِّ، أو ε المُحتثّة. للحصولِ على مقدارِ ε المُحتثّة، عليكَ باستعمالِ قانونِ فاراداي للحثِّ المغناطيسيِّ. بشأنِ دائرةٍ حلقيّةٍ منفردةٍ، ينصُّ القانونُ على ما يلي:

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi_{\text{المغناطيسي}}}{\Delta t}$$



الشكل 6-6

تُعرَّفُ الزاويةُ θ بأنها الزاويةُ المحصورةُ بين اتّجاهِ المجالِ المغناطيسيِّ والعموديِّ على مستوى الحلقةِ. يمثِّلُ $B\cos\theta$ مُركّبةَ المجالِ المغناطيسيِّ العموديّةَ على مستوى الحلقةِ.

نذكِّرُ بأن التدفُّقَ المغناطيسيَّ، من الفصلِ السابقِ، يمكنُ أن يكتبَ على الشكلِ التالي: $AB\cos\theta$. تعني هذه المعادلةُ أن أيَّ تغيُّرٍ بالنسبةِ إلى الزمنِ لأيٍّ من المتغيِّراتِ الثلاثةِ وهي: المجالُ المغناطيسيُّ B أو مساحةُ الدائرةِ A أو اتِّجاهُها θ، يمكنُ أن يؤدّيَ إلى قوّةٍ دافعةٍ كهربائيةٍ مُحتثّةٍ. تمثِّلُ الكمّيّةُ $B\cos\theta$ مُركّبةَ المجالِ المغناطيسيِّ العموديّةَ على مستوى الحلقةِ. تقاسُ الزاويةُ بينَ اتِّجاهِ المجالِ المغناطيسيِّ المطبَّقِ والعموديِّ على مستوى الحلقةِ، كما في **الشكل 6-6**.

تُضافُ الإشارةُ السالبةُ إلى معادلةِ قانونِ فاراداي، للدلالةِ على قطبيّةِ القوّةِ الدافعةِ الكهربائيّةِ المُحتثّةِ. تدلُّ هذه الإشارةُ على أن المجالَ المغناطيسيَّ المُحتَثَّ يُعاكسُ التغيُّرَ الطارئَ على المجالِ المغناطيسيِّ المطبَّقِ، كما ينصُّ قانونُ لنز.

إذا احتوَتِ الدائرةُ على عددِ N من اللفّاتِ، يكونُ مُتوسِّطُ القوّةِ الدافعةِ الكهربائيّةِ المُحتثّةِ حاصلَ ضربِ N بالقوّةِ الدافعةِ لحلقةٍ واحدةٍ. تتّخذُ المعادلةُ عندَها الشكلَ العامَّ لقانونِ فاراداي للحثِّ المغناطيسيِّ.

قانونُ فاراداي للحثِّ المغناطيسيِّ

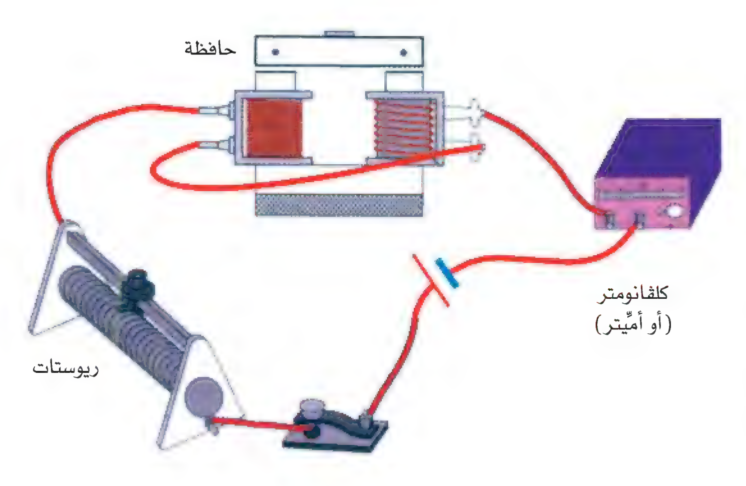
$$\varepsilon = -N\frac{\Delta\Phi_{\text{المغناطيسي}}}{\Delta t}$$

متوسِّطُ ε المحتثّة = − عددَ لفّاتِ الدائرة ×
معدَّلِ تغيُّرِ التدفقِ المغناطيسيِّ بالنسبةِ إلى الزمنِ لحلقةٍ واحدةٍ

نستعملُ N في هذا الفصلِ دائمًا كعددٍ صحيحٍ.

نذكِّرُ بأن وحدةَ قياسِ شدّةِ المجالِ المغناطيسيِّ في نظامِ SI هي تسلا (T)، وهي تساوي نيوتن على أمبير في متر أي $\frac{N}{A{\bullet}m}$. يمكن أن تُكتب تسلا أيضًا كفولت•ثانية على مترٍ مربَّعٍ، أي $\frac{V{\bullet}s}{m^2}$. لذلك تكونُ وحدةُ قياسِ ε كوحدةِ قياسِ الجُهدِ الكهربائيِّ، أي ڤولت (V).

الحَثُّ الذاتيُّ Self Induction



الشكل 7-6
دائرةُ الحثِّ الذاتيِّ، المؤلَّفةُ من مغناطيسٍ كهربائيٍّ وريوستاتٍ ومصدرٍ كهربائي مناسبٍ.

في **الشكل 7-6** الدائرةُ تحوي كلفانومترًا (أمّيترًا)، مغناطيسًا كهربائيًّا بملفَّين كلٌّ منهما يحوي 1200 لفّةٍ، ريوستاتًا، مصدرًا كهربائيًّا مناسبًا.

نحرِّكُ الريوستاتَ، حتى يشيرَ مؤشّرُ الأمّيتر إلى 50 mA مثلاً. وعندَ وضعِ الحافظةِ تتناقصُ قراءةُ الأمّيتر ممّا يدلُّ على نقصِ شدَّةِ التيّارِ في الدائرةِ، ثم يعودُ إلى وضعِه الأصليِّ. وعندَ رفعِ الحافظةِ بعدئذٍ، يتحرَّكُ المؤشّرُ دالاً على زيادةٍ مؤقّتةٍ لشدَّةِ التيّارِ في أثناءِ تناقصِ التدفّق.

وإذا زدْنا شدَّةَ التيّارِ أو أنقصناها في الدائرةِ فإن مقدارَ التدفُّقِ المغناطيسيِّ الذي يجتازُ لفّاتِ الملفِّ يكونُ متغيِّرًا أثناءَ ذلك. لذا تتولَّدُ قوّةٌ دافعةٌ كهربائيَّةٌ ذاتيَّةٌ مضادَّةٌ أثناءَ زيادةِ شدَّةِ التيّارِ، وطرديَّةٌ أثناءَ نقصانِ شدَّةِ التيّارِ.

ممّا سبقَ يتبيَّنُ لنا الآتي: إذا حدثَ تغيُّرٌ في التدفّقِ المغناطيسيِّ الخاصِّ بملفٍّ، نتيجةً لتغيُّرِ شدَّةِ التيّارِ المارِّ فيه، فإن ذلك التغيُّرَ في التدفُّقِ سيؤثِّرُ في الملفِّ، بحيثُ يولِّدُ فيه قوّةً دافعةً كهربائيَّةً تقاومُ التغيُّرَ الحادثَ في التيّارِ الأصليِّ المارِّ في الملفِّ نفسِه، وتُسمّى هذه الظاهرةُ بظاهرةِ **الحثِّ الذاتيِّ** self induction وهي: «عمليَّةُ تولُّدِ قوّةٍ دافعةٍ كهربائيَّةٍ في الملفِّ نفسِه نتيجةَ تغيُّرِ شدَّةِ التيّارِ المارِّ فيه».

الحثُّ الذاتيُّ

توليدُ قوّةٍ دافعةٍ كهربائيَّةٍ في ملفٍّ نتيجةَ تغيُّرِ شدَّةِ التيّارِ المارِّ فيه.

ولحسابِ مقدارِ القوّةِ الدافعةِ الكهربائيَّةِ التأثيريَّةِ الذاتيَّةِ، نفرضُ الآتي: إذا مرَّ بالملفِّ تيّارٌ شدَّتُه I، فإن ذلك يسبِّبُ تدفُّقًا مغناطيسيًّا مقدارُه Φ يجتازُ كلَّ لفَّةٍ من لفّاتِ الملفِّ، ويتناسبُ مقدارُه طرديًّا مع شدَّةِ التيّارِ.

وإذا تغيَّرَتْ شدَّةُ التيّارِ بمعدَّلِ $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ فإن التدفُّقَ المتولِّدَ يتغيَّرُ بمعدَّلِ $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$، ويتناسبُ طرديًّا مع المعدَّلِ الزمنيِّ لتغيُّرِ شدَّةِ التيّارِ مما يؤدّي إلى تولُّدِ قوّةٍ دافعةٍ كهربائيَّةٍ ذاتيَّةٍ ε، يتناسبُ مقدارُها طرديًّا مع المعدَّلِ الزمنيِّ لتغيُّرِ شدَّةِ التيّارِ، أي إن:

$$\varepsilon = -N\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

لكن

$$\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \propto \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

لذلك:

$$\varepsilon = -(N \times \text{ثابت})\left(\frac{\Delta I}{\Delta t}\right)$$

معاملُ الحثِّ الذاتيِّ L

نسبةُ التدفُّقِ المغناطيسيِّ الذي يجتازُ ملفًّا معيَّنًا إلى التيّارِ المارِّ فيه.

والمقدارُ الثابتُ (ثابت × N) يعتبرُ ثابتًا بالنسبةِ إلى الملفِّ الواحدِ، ويُسمّى **معاملَ الحثِّ الذاتيِّ** للملفِّ coefficient of self induction (أو معاملَ التأثيرِ الذاتيِّ) ويرمزُ إليه بالرمزِ L، ويقاسُ بوحدةِ ڤولت•ثانية/أمبير، وتسمّى هنري H نسبة إلى مكتشفِ ظاهرةِ الحثِّ الذاتيِّ. لذا تصبحُ علاقةُ هذه القوّةِ الدافعةِ الكهربائيَّةِ الذاتيَّةِ المتولِّدةِ في الملفِّ بالشكل:

$$\varepsilon = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}$$

ومنها نجدُ أن:

$$L = \frac{-\varepsilon}{\frac{\Delta I}{\Delta t}}$$

لذا يعرفُ L بأنه يساوي عدديًّا مقدارَ القوَّةِ الدافعةِ الكهربائيَّةِ المتولِّدةِ في الملفِّ نفسِه نتيجةَ تغيُّرِ شدَّةِ التيّارِ في الملفِّ بمعدَّلِ أمبيرٍ واحدٍ لكلِّ ثانيةٍ.

معاملُ الحثِّ الذاتيِّ لملفٍّ لولبيٍّ

في **الشكل 6-8** دائرةٌ كهربائيَّةٌ يتَّصلُ ملفُّها اللولبيُّ بمصدرٍ كهربائيٍّ. يحوي الملفُّ N لفَّةً، وطولُه l ومساحةُ مقطعِه A. عندَ لحظةِ غلقِ الدائرةِ يزدادُ التيّارُ من الصفرِ إلى قيمةٍ ثابتةٍ I. وفي هذه الفترةِ ينشأُ تدفُّقٌ مغناطيسيٌّ تزدادُ قيمتُه من صفرٍ إلى Φ، ممّا يؤدّي إلى تولُّدِ قوَّةٍ دافعةٍ كهربائيَّةٍ مضادةٍ للقوَّةِ الدافعةِ الكهربائيَّةِ الأصليَّةِ، وبهذا فإن:

$$\varepsilon = -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}$$

$$-N\,\Delta\Phi = -L\,\Delta I$$

وعليه يكونُ: $N(\Phi - 0) = -L(I - 0)$

لذلك: $N\,\Phi = L\,I$

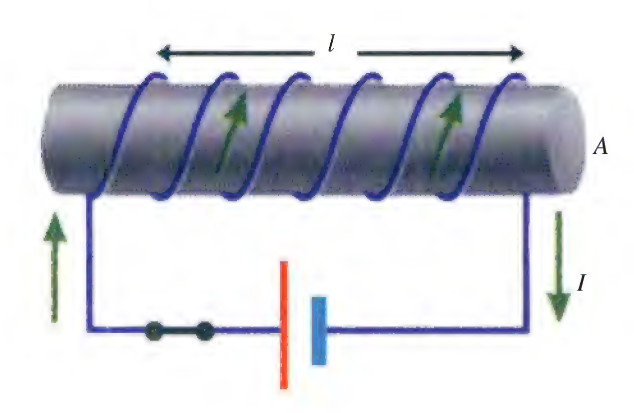
وكذلك فإن: $\Phi = B \bullet A$

وباستبدالِ B بالمقدارِ $\frac{\mu NI}{l}$ للملفِّ اللولبيِّ فإنَّ:

$$LI = \frac{N\mu NIA}{l}$$

لذلك يكونُ معاملُ التأثيرِ الذاتيِّ للملفِّ اللولبيِّ يساوي:

$$L = \frac{\mu N^2 A}{l}$$



الشكل 6-8
معامل الحثُّ الذاتيّ لملفٍّ لولبيٍّ يعتمد على أبعاده وعدد لفاته ونوع مادّة نواته.

مثال 6 (أ)

الحثُّ الذاتيُّ

المسألة

ملفٌّ كهربائيٌّ طولُه 10 cm، ومساحةُ مقطعِه $25\ cm^2$ وعددُ لفّاتِه 400 لفَّةٍ، وقلبُه فارغٌ (هواء) يمرُّ به تيّارٌ كهربائيٌّ شدَّتُه 4.0 A، احسبْ مقدارَ التدفُّقِ المغناطيسيِّ الذي يجتازُ مقطعَ الملفِّ. وإذا عُكسَ اتِّجاهُ التيّارِ خلالَ زمنٍ قدرُه 0.1 s، فاحسبِ القوَّةَ الدافعةَ الكهربائيَّةَ المتولِّدةَ.

الحلّ

1. أعرِّف

المعطى: $l = 10\ cm$ $\quad A = 25\ cm^2$ $\quad N = 400$

$I = 4.0\ A$ $\quad \mu_o = 4\pi \times 10^{-7}\ T{\bullet}m/A$

المجهول: $\Phi = ?$ $\quad \varepsilon = ?$

2. أخطِّط

أختارُ معادلةً أو موقفًا: أستعملُ علاقةَ معاملِ الحثِّ الذاتيِّ.

$$L = \frac{\mu N^2 A}{l}$$

3. أحسب

أعوِّض القيمَ في المعادلةِ وأحسبُ:

$$L = \frac{\mu N^2 A}{l} = \frac{(4\pi \times 10^{-7}\ T{\bullet}m/A)\ (400)^2 (25 \times 10^{-4}\ m^2)}{(10 \times 10^{-2}\ m)}$$

$$L = 5.03 \times 10^{-3}\ H$$

لكن

$$N\Phi = LI$$

$$400 \times \Phi = (5.03 \times 10^{-3}\ H) \times (4\ A)$$

$$\Phi = \frac{(5.03 \times 10^{-3}\ H)\ (4A)}{400} = \boxed{5 \times 10^{-5}\ T{\bullet}m^2}$$

$$\varepsilon = -L\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{(-5.03 \times 10^{-3}\ H)\ (-8\ A)}{0.1\ s} = \boxed{0.4\ V}$$

تطبيق 6 (أ)

الحثُّ الذاتيُّ

1. يرتفعُ التيّارُ الكهربائيُّ المارُّ في دائرةٍ من 0.0 A إلى 10 A خلالَ 0.1 s. إذا كانَ مُعاملُ الحثِّ الذاتيِّ للدائرةِ 0.02 H، فاحسبِ القوَّةَ الدافعةَ الكهربائيَّةَ في الدائرةِ.
2. أيُّهما يؤدّي إلى ارتفاعٍ أكبرَ في معاملِ الحثِّ الذاتيِّ لملفٍّ: مضاعفةُ عددِ لفّاتِه أم مضاعفةُ مساحةِ مقطعِه؟ لماذا؟

مثال 6 (ب)

القوّةُ الدافعةُ الكهربائيَّةُ المُحتثَّةُ والتيّارُ المُحتثُّ

المسألة

ملفٌ مؤلَّفٌ من 25 لفّةً، يحيطُ بأنبوبٍ هوائيٍّ مساحةُ مقطعِه **$1.8\ m^2$**. كلُّ لفَّةٍ لها مساحةُ مقطعِ الأنبوبِ نفسُها. طُبِّقَ مجالٌ مغناطيسيٌّ منتظمٌ بشكلٍ عموديٍّ على مستوى الملفِّ. إذا ازدادَتْ شدَّةُ المجالِ بشكلٍ منتظمٍ من **0.00 T** إلى **0.55 T** خلالَ **0.85 s**، احسُبْ مقدارَ ε المُحتثَّةِ في الملفِّ. إذا كانَتْ مقاومةُ الملفِّ **2.5 Ω**، احسُبْ شدَّةَ التيّارِ المُحتثِّ في الملفِّ.

الحـــلّ

1. أعرِّف

المعطى:

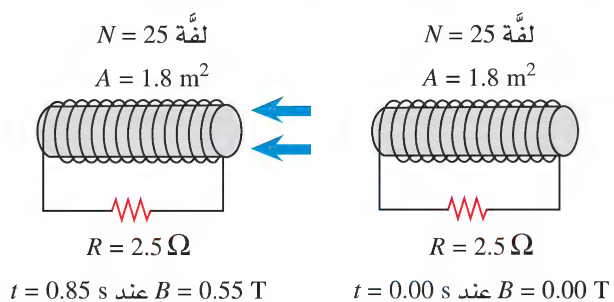
$\Delta t = 0.85\ s$ $A = 1.8\ m^2$ $\theta = 0.0°$ $N = 25$ لفّة

$B_{\text{ابتدائية}} = 0.00\ T = 0.00\ V{\bullet}s/m^2$ $B_{\text{نهائية}} = 0.55\ T = 0.55\ V{\bullet}s/m^2$

$R = 2.5\ \Omega$

المجهول: $\varepsilon = ?$ $I = ?$

الرسم: أبيِّنُ الملفَّ قبلَ تغيُّرِ شدَّةِ المجالِ المغناطيسيِّ وبعدَهُ.



2. أخطِّط

أختارُ معادلةً أو موقفًا: أستعملُ قانونَ فاراداي للحثِّ المغناطيسيِّ، لإيجادِ ε في الملفِّ.

$$\varepsilon = -N\frac{\Delta\Phi_{\text{المغناطيسي}}}{\Delta t} = -N\frac{\Delta[AB\cos\theta]}{\Delta t}$$

أعوِّضُ ε في تعريفِ المقاومةِ، لأحسبَ التيّارَ المُحتثَّ في الملفِّ: $I = \frac{\varepsilon}{R}$

أعيدُ ترتيبَ المعادلةِ لأعزلَ المجهولَ: في هذا المثالِ، وحدَها شدَّةُ المجالِ المغناطيسيِّ تتغيَّرُ معَ الزمنِ. أما باقي المُركَّباتِ (مساحةُ الملفِّ والزاويةُ الناشئةُ بينَ المجالِ والملفِّ) فتبقى ثابتةً.

$$\varepsilon = -NA\cos\theta\frac{\Delta B}{\Delta t}$$

3. أحسب

أعوِّضُ القيمَ في المعادلةِ وأحلُّ:

$$\varepsilon = -(25)(1.8\ \cancel{m^2})(\cos 0.0°)\frac{\left((0.55-0.00)\ \frac{V{\bullet}\cancel{s}}{\cancel{m^2}}\right)}{(0.85\ \cancel{s})} = \boxed{-29\ V}$$

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{-29\ V}{2.5\ \Omega} = \boxed{-12\ A}$$

ملاحظة بما أن أقلَّ عدد للخانات المعنويَّة هو 2، فيجبُ تقريبُ جواب الآلة الحاسبة 29.11764706 إلى رقمَيْن معنويَّيْن، أي 29.

4. أقيِّم يكونُ اتِّجاهُ ε المحتثَّةِ والتيّارِ المُحتَثِّ في الملفِّ، بحيثُ يعاكسُ المجالُ المغناطيسيُّ الناتجُ عن التيّارِ المُحتَثِّ، التغيُّرَ الطارئَ على المجالِ المغناطيسيِّ المطبَّق. في الرسمِ الموضَّحِ على الصفحةِ السابقةِ، يكونُ اتِّجاهُ المجالِ المغناطيسيِّ المُحتَثِّ نحوَ اليمين، والتيّارُ المسبِّبُ له يتَّجهُ من اليسارِ إلى اليمينِ، داخلَ المُقاوِمة.

تطبيق 6 (ب)

القوَّةُ الدافعةُ الكهربائيَّةُ المُحتثَّةُ والتيّارُ المحتثُّ

1. توضعُ حلقةٌ دائريَّةٌ منفردةٌ نصفُ قُطرِها 22 cm في مجالٍ مغناطيسيٍّ خارجيٍّ منتظم، شدَّتُه 0.50 T بحيثُ يكونُ مستوى الحلقةِ عموديًّا على اتِّجاهِ المجال. أُخرجَتِ الحلقةُ من المجالِ خلالَ 0.25 s. احسُبْ متوسِّطَ ε المحتثَّةِ خلالَ هذه الفترة.

2. ملفٌّ مؤلَّفٌ من 205 لفّاتٍ من السلكِ، له مقاومةُ 23 Ω ومساحةُ مقطع $0.25\ m^2$، وُضعَ مستواهُ بشكلٍ عموديٍّ على مجالٍ كهرومغناطيسيٍّ قويٍّ. ما متوسِّطُ التيّارِ المُحتَثِّ في الملفِّ خلالَ 0.25 s تنخفضُ خلالَها شدَّةُ المجالِ من 1.6 T إلى 0.0 T؟

3. وُضعَتْ حلقةُ سلكٍ دائريَّةٍ نصفُ قُطرِها 0.33 m في مجالٍ مغناطيسيٍّ خارجيٍّ شدَّتُه +0.35 T وعموديٍّ على مستوى الحلقةِ. تتغيَّرُ شدَّةُ المجالِ إلى 0.25 T – خلالَ 1.5 s. (الإشارةُ السالبةُ للمجالِ تعني أنه معاكسٌ لاتِّجاهِ الحلقةِ.) جدْ مقدارَ ε خلالَ هذه الفترة.

نافذةٌ على الموضوع
لواقطُ الكيتارِ الكهربائيِّ

يُطلقُ اسمُ اللاقطِ على آلةٍ تلتقطُ صوتَ جهازٍ معيَّن، وتحوِّلُهُ إلى إشارةٍ كهربائيَّةٍ. تستعمل أشهرُ أنواعِ لواقطِ الكيتارِ الكهربائيِّ الحثَّ الكهرومغناطيسيَّ لتحويلِ اهتزازِ الأوتارِ إلى طاقةٍ كهربائيَّةٍ.

الجزءُ الأساسيُّ من اللواقطِ المغناطيسيَّةِ يتألَّفُ من مغناطيسٍ دائمٍ وملفِّ سلكٍ نحاسيٍّ. تقومُ قطعةٌ قطبيَّةٌ تحتَ كلِّ وترٍ بتكثيفِ المجالِ المغناطيسيِّ وإعطائِه شكلاً معيَّنًا. وبما أن أوتارَ الكيتارِ مصنوعةٌ من موادَّ مغناطيسيَّةٍ (فولاذ أو نيكل)، يؤدّي الاهتزازُ في وترِ الكيتارِ إلى تغيُّرٍ في المجالِ المغناطيسيِّ فوقَ اللاقطِ. يحثُّ المجالُ المغناطيسيُّ المتغيِّرُ تيّارًا في ملفِّ اللاقطِ. تُلَفُّ عدَّةُ لفّاتٍ من سلكٍ رفيعٍ ومحدَّدِ القياسِ حولَ كلِّ قطبٍ. يحدِّدُ عددُ اللفّاتِ شدَّةَ التيّارِ الذي ينتجُهُ اللاقطُ. فاللفّاتُ الأكثرُ تنتجُ تيّارًا أكبرَ.

للواقطِ الكيتارِ الكهربائيِّ أنواعٌ متعدِّدةٌ ومختلفةٌ. كما يمكنُ أن يكونَ للكيتارِ الواحدِ نوعان أو أكثرُ من اللواقطِ. أحدُ هذه الأنواعِ هو اللاقطُ، المصمَّمُ لتقليلِ الضجيجِ أو الطنينِ الذي تحدثُهُ لواقطُ التيّارِ المتناوبِ ذاتُ الملفِّ الواحدِ. اللفّاتُ والمغانطُ وموقعُ اللواقطِ كلُّها تؤثِّرُ في الصوتِ الذي يصدرُه الكيتارُ واللاقطُ.

التياراتِ الدوَّامية (تيّارات فوكو)

عندما يتحرَّك لوح فلزّي في مجال مغناطيسيّ، تؤدّي ظاهرة الحثّ الكهرومغناطيسيّ الناتجة من تغيُّر التدفُّق المغناطيسيّ إلى تيّاراتٍ حلقية محتثَّة تسمّى **التيارات الدوامية** eddy currents، والتي تقاوم بدورها التغيُّر الأساسي للتدفُّق المغناطيسي. لذلك تتحوَّلُ الطاقةُ الحركيةُ الناتجة من تحريكِ المادةِ الفلزيةِ في المجال المغناطيسيّ إلى طاقةٍ حراريةٍ تتوزَّعُ في حجم المادة.

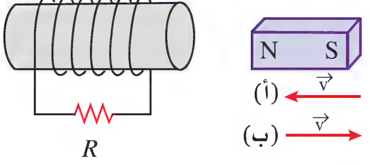
تُستعملُ التيارات الدواميةُ في الأفرانِ وأنظمةِ الفراملِ في السيّارات، وكذلك في الكشفِ عن المعادنِ في المطاراتِ وتحت الأرض.

التيّارات الدوامية

التيّاراتُ الحلقيةُ المحتثَّةُ داخلَ المادَّةِ الفلزّية.

مراجعةُ القسم 1-6

1. حلقةُ تيّارٍ دائريَّةٌ مصنوعةٌ من سلكٍ مرنٍ، توضعُ في مجالٍ مغناطيسيٍّ. صفْ ثلاثَ طرائق يمكنُ فيها حثُّ ε في الحلقةِ.



2. يوضعُ قضيبٌ مغناطيسيٌّ قربَ ملفٍّ سلكيٍّ، كما هو موضَّحٌ. ما اتِّجاهُ التيّارِ في المقاومة، إذا تحرَّكَ المغناطيسُ إلى اليسارِ كما في (أ)؟ إلى اليمينِ كما في (ب)؟

3. ملفٌّ فيه 256 لفَّةً، ومساحةُ مقطعِهِ $0.0025\ m^2$، وضعَ في مجالٍ مغناطيسيٍّ خارجيٍّ منتظمٍ، شدَّتُه $0.25\ T$، بحيثُ يكونُ مستوى الملفِّ عموديًّا على اتِّجاهِ المجال. سُحِبَ الملفُّ بانتظامٍ من المجالِ خلالَ $0.75\ s$. جدْ متوسَّطَ ε المُحتَثَّةِ خلالَ هذه الفترةِ.

4. **تفكيرٌ ناقد:** تُصنعُ أوتارُ الكيتارِ الكهربائيِّ من موادَّ مغناطيسيَّةٍ معدنيَّةٍ يمكنُ مغنطتُها. تقعُ الأوتارُ قربَ الملفِّ السلكيِّ وتكونُ عموديَّةً عليه. توجدُ مغانطُ دائمةٌ داخلَ الملفِّ تُمغنطُ أجزاءَ الأوتارِ الواقعةِ فوقَها. استعملْ هذه المعطياتِ لتُبيِّنَ كيفَ تؤدّي اهتزازاتُ الأوتارِ المطروقةِ إلى إنتاجِ إشاراتٍ كهربائيَّةٍ لها تردُّدُ الوترِ المهتزِّ نفسُه.

القسم 6-2

المولِّداتُ والمحرِّكاتُ والحثُّ المتبادلُ

Generators, Motors, and Mutual Inductance

6-2 أهداف القسم

- يصفُ طريقةَ عملِ المولِّداتِ والمحرِّكاتِ.
- يصفُ تحوُّلَ الطاقةِ الذي يجري داخلَ المولِّداتِ والمحرِّكاتِ.
- يوضحُ كيفَ ينشأُ الحثُّ المتبادَلُ بينَ الدوائرِ.
- يحلُّ مسائلَ على القوَّةِ الدافعةِ الكهربائيَّةِ.

المولِّد

آلةٌ تحوِّلُ الطاقةَ الميكانيكيَّةَ إلى طاقةٍ كهربائيَّةٍ.

المولِّداتُ والتيّارُ المتناوبُ

في القسمِ السابقِ، عرفْتَ أن بالإمكانِ حثَّ تيّارٍ في دائرةٍ، إما بتغييرِ شدَّةِ المجالِ المغناطيسيِّ، وإما بتحريكِ الملفِّ إلى داخلِ المجالِ المغناطيسيِّ أو إلى خارجِه. يمكنُ أيضًا حثُّ التيّارِ بطريقةٍ أخرى، وهي تغييرُ اتِّجاهِ الحلقةِ في المجالِ المغناطيسيِّ.

هذه الطريقةُ الأخيرةُ لحثِّ التيّارِ، تمثِّلُ وسيلةً عمليَّةً لتوليدِ الطاقةِ الكهربائيَّةِ. في الحقيقةِ، تتحوَّلُ الطاقةُ الميكانيكيَّةُ المستعملةُ لتدويرِ الحلقةِ إلى طاقةٍ كهربائيَّةٍ. يُسمّى الجهازُ الذي يقومُ بهذا التحويلِ **بالمولِّدِ الكهربائيِّ** generator. في معظمِ محطّاتِ إنتاجِ الطاقةِ، تتوفَّرُ الطاقةُ الميكانيكيَّةُ على شكلِ حركةٍ دورانيَّةٍ. فمثلاً، في محطّاتِ إنتاجِ الطاقةِ الكهربائيَّةِ من طاقةِ المياهِ، تسقطُ شلّالاتُ المياهِ على شفراتِ توربيناتٍ، وتتسبَّبُ في دورانِها. وفي محطّاتِ الفحمِ الحجريِّ أو الطاقةِ الغازيَّةِ، تُستعملُ الطاقةُ الناتجةُ عن حرقِ الوقودِ لتحويلِ الماءِ إلى بخارٍ يوجَّهُ نحوَ شفراتِ التوربينِ، فيسبِّبُ دورانَها.

يستعملُ المولِّدُ، بشكلٍ أساسيٍّ، حركةَ التوربينِ الدوّارةَ، لتدويرِ حلقةٍ في مجالٍ مغناطيسيٍّ. يظهرُ **الشكلُ 6-9** مولِّدًا بسيطًا. عندَ دورانِ الحلقةِ، تتغيَّرُ مساحتُها الفعّالةُ معَ الزمنِ، ما يؤدّي إلى $\mathcal{E}$ وتيّارٍ محتثَّيْنِ في الدائرةِ الخارجيَّةِ الموصولةِ بطرفَيِ الحلقةِ.

الشكل 6-9

في مولِّدٍ بسيطٍ، يؤدّي دورانُ الحلقةِ الموصلةِ في مجالٍ مغناطيسيٍّ منتظمٍ إلى تولُّدِ تيّارٍ متناوبٍ في الحلقةِ.

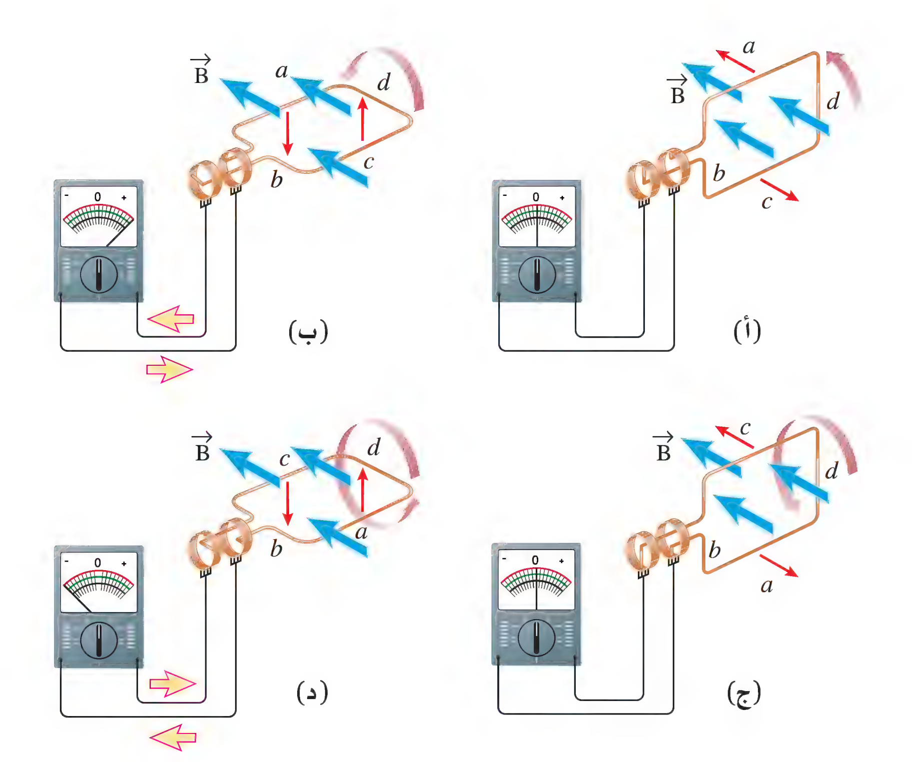


المولِّدُ وإنتاجُ القوَّةِ الدافعةِ الكهربائيَّةِ المتغيِّرةِ باستمرارٍ

افترضْ حلقةً مستطيلةً من السلكِ، تدورُ بسرعةٍ زاويَّةٍ ثابتةٍ في مجالٍ مغناطيسيٍّ منتظمٍ. يمكنُ التعاملُ مع الحلقةِ كأربعةِ أسلاكٍ متفرِّقةٍ. تدورُ الحلقةُ في هذهِ الحالةِ باتِّجاهٍ معاكسٍ لدورانِ عقاربِ الساعةِ، في مجالٍ مغناطيسيٍّ يتَّجهُ نحوَ اليسارِ.

عندَما تكونُ مساحةُ الحلقةِ عموديَّةً على خطوطِ المجالِ المغناطيسيِّ كما في **الشكلِ 6-10** (أ)، يكونُ كلُّ جزءٍ من سلكِ الحلقةِ مُتحرِّكًا بشكلٍ موازٍ لخطوطِ المجالِ المغناطيسيِّ. في هذه اللحظةِ، لا يطبِّقُ المجالُ المغناطيسيُّ أيَّ قوَّةٍ على الشحناتِ، في أيٍّ من أجزاءِ السلكِ، وتكونُ $\mathcal{E}$ المحتثَّةُ في كلِّ جزءٍ صفرًا.

بعدَ أن تدورَ الحلقةُ إلى موقعٍ آخرَ، يقطعُ ضلعاها a و c خطوطَ المجالِ المغناطيسيِّ، وبذلك تزدادُ القوَّةُ المغناطيسيَّةُ على الشحناتِ في هذَيْنِ الضلعَيْنِ. وبالتالي تزدادُ القوَّةُ الدافعةُ الكهربائيَّةُ المحتثَّةُ. يكونُ اتِّجاهُ القوَّةِ المغناطيسيَّةِ على الشحناتِ في الضلعَيْنِ b و d إلى خارجِ السلكِ، وبالتالي لا تساهمُ حركةُ هذَيْنِ الضلعَيْنِ في $\mathcal{E}$ والتيّارِ المحتثَّيْنِ. نحصلُ على أقصى قوَّةٍ مغناطيسيَّةٍ على الشحناتِ، وبالتالي على أقصى $\mathcal{E}$ محتثَّةٍ، في اللحظةِ التي تكونُ فيها حركةُ الضلعَيْنِ a و c



الشكل 10-6
للحلقةِ الدوَّارةِ في مجالٍ مغناطيسيٍّ، تكونُ Ɛ المحتثَّةُ صفرًا، عندما تكونُ الحلقةُ عموديَّةً على خطوطِ المجالِ، كما في (أ) و (ج)، ويكونُ لها قيمةٌ قصوى عندما تكونُ الحلقةُ موازيةً لخطوطِ المجالِ، كما في (ب) و (د).

عموديَّةً على خطوطِ المجالِ المغناطيسيِّ، كما في **الشكل 10-6** (ب). يحدثُ ذلك عندَما يكونُ مستوى الحلقةِ موازيًا لخطوطِ المجالِ.

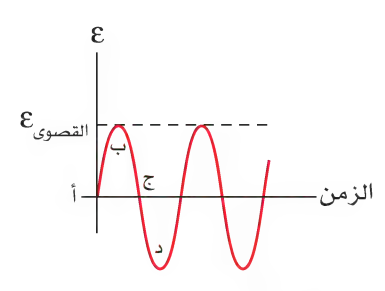
وبما أن الضلعَ a يتحرَّكُ إلى أسفلَ، خلالَ المجالِ المغناطيسيِّ ويتحرَّكُ الضلعُ c إلى أعلى، تكونُ Ɛ للضلعِ a وللضلعِ c متعاكستَيْن، إلا أنهما تنتجانِ تيّارًا في الاتِّجاهِ نفسِه، وهو اتِّجاهُ دورانِ عقاربِ الساعةِ. بينَما تتابعُ الحلقةُ دورانَها، يقطعُ الضلعانِ a و c خطوطَ مجالٍ أقلَّ، فتنخفضُ القوَّةُ الدافعةُ الكهربائيَّةُ. عندَما يصبحُ مستوى الحلقةِ عموديًّا على خطوطِ المجالِ، تصبحُ حركةُ كلٍّ من الضلعَيْنِ a و c موازيةً لخطوطِ المجالِ، وتكونُ Ɛ المحتثَّةُ صفرًا مرَّةً أخرى، كما في **الشكل 10-6** (ج). بعد ذلكَ تصبحُ حركةُ الضلعَيْنِ a و c معاكسةً لاتِّجاهِ حركتِهما أثناءَ الانتقالِ من الحالةِ (أ) إلى الحالةِ (ب). لذلك تنعكسُ قطبيَّةُ Ɛ المحتثَّةِ، وينعكسُ كذلك اتِّجاهُ التيّارِ كما في **الشكل 10-6** (د).

يُظهِرُ **الشكلُ 11-6** رسمًا بيانيًّا لتغيُّرِ Ɛ بدلالةِ الزمنِ، عندَ دورانِ الحلقةِ. لاحظِ التشابهَ بينَ هذا الرسمِ البيانيِّ ومنحنى دالَّةِ الجيبِ. المواقعُ الأربعةُ على الرسمِ البيانيِّ تمثِّلُ اتِّجاهَ الحلقةِ بالنسبةِ إلى المجالِ المغناطيسيِّ في **الشكل 10-6**. في الموقعَيْنِ أ و ج تكون Ɛ صفرًا. يمثِّلُ هذانِ الموقعانِ اللحظتَيْنِ اللتَيْنِ تكونُ فيهما الحلقةُ عموديةً على اتِّجاهِ المجالِ المغناطيسيِّ. لكن، عندَ الموقعَيْنِ ب و د، تبلغُ Ɛ أقصاها وأدناها على التوالي. يتمُّ ذلك عندَما تكونُ الحلقةُ موازيةً لاتِّجاهِ المجالِ المغناطيسيِّ.

تنتجُ القوَّةُ الدافعةُ الكهربائيَّةُ المحتثَّةُ عن التغيُّرِ المتواصلِ في الزاويةِ θ بينَ اتِّجاهِ المجالِ المغناطيسيِّ والعموديِّ على مستوى الحلقةِ. المعادلةُ التاليةُ للقوَّةِ الدافعةِ الكهربائيَّةِ الناتجةِ عن مولِّدٍ يمكنُ اشتقاقُها من قانونِ فاراداي للحثِّ. الاشتقاقُ غيرُ واردٍ هنا لأنَّه يحتاجُ إلى تحليلٍ رياضيٍّ. في هذه المعادلةِ، استُبدِلَ بزاويةِ الاتِّجاهِ θ التعبيرُ المكافئُ ωt، حيث ω الترددُّ الزاويُّ للدورانِ ($2\pi f$).



$$\mathcal{E} = NAB\omega \sin(\omega t)$$



الشكل 11-6
يظهرُ تغيُّرُ Ɛ المحتثَّةِ بدلالةِ الزمنِ في حلقةٍ دوَّارةٍ على شكلِ موجةٍ جيبيَّةٍ. تشيرُ الأحرفُ على الرسمِ إلى مواقعِ الملفِّ في الشكل 10-6.

تصفُ هذه المعادلةُ التغيُّرَ الجيبيَّ للقوَّةِ الدافعةِ الكهربائيَّةِ مع الزمنِ، كما هو موضَّحٌ في **الشكل 6-11**.

يمكنُ الحصولُ على القيمةِ القصوى للقوَّةِ الدافعةِ الكهربائيَّةِ لدالَّةِ الجيبِ. يكونُ لـ ε قيمةٌ قصوى عندَما يكونُ مستوى الحلقةِ موازيًا لخطوطِ المجالِ المغناطيسيِّ، أي عندَما يكونُ $\sin(\omega t) = 1$، وهذا يحدثُ عندَما $\omega t = \theta = 90^\circ$. في هذه الحالةِ تؤولُ المعادلةُ أعلاه إلى:

$$\varepsilon_m = NAB\omega$$

لاحظْ أن القيمةَ القصوى ε_m تعتمدُ على أربعةِ متغيِّراتٍ، هي: عددُ اللفّاتِ N، ومساحةُ الحلقةِ A، وشدَّةُ المجالِ المغناطيسيِّ B، والتردُّدُ الزاويُّ لدورانِ الحلقة ω.

تغيُّرُ اتِّجاهِ التيّارِ المتناوبِ

لاحظْ أن قيمَ ε في **الشكل 6-11** تتناوبُ بينَ قيمٍ موجبةٍ وأُخرى سالبةٍ. نتيجةً لذلك، يغيِّرُ التيّارُ الناتجُ عن المولِّدِ اتِّجاهَه في فتراتٍ زمنيَّةٍ متساويةٍ. يُسمّى هذا النوعُ **التيّارَ المتناوبَ** alternating current، أو ببساطةٍ AC.

التيّارُ المتناوبُ

تيّارٌ كهربائيٌّ يغيِّرُ اتِّجاهَهُ، في فتراتٍ زمنيَّةٍ متساويةٍ، ومقدارَه في كل لحظةٍ.

تحدِّدُ وتيرةُ دورانِ الملفِّ في مولِّدِ AC القيمةَ القصوى لـ ε الناتجةِ. يختلفُ تردُّدُ التيّارِ المتناوبِ بينَ بلدٍ وآخرَ. ففي الولاياتِ المتَّحدةِ الأميركيَّةِ وكندا وأميركا الوسطى، يكونُ تردُّدُ دورانِ المولِّداتِ التجاريَّةِ 60 Hz. يعني ذلك أن ε تغيِّرُ اتِّجاهَها خلالَ دورةٍ كاملةٍ 60 مرَّةً في الثانيةِ الواحدةِ. أما المملكةُ المتَّحدةُ وأوروبا ومعظمُ آسيا وأفريقيا، فالتردُّدُ فيها يبلغُ 50 Hz. (تذكَّرْ أن $\omega = 2\pi f$، حيث f التردُّدُ بوحدةِ Hz.)

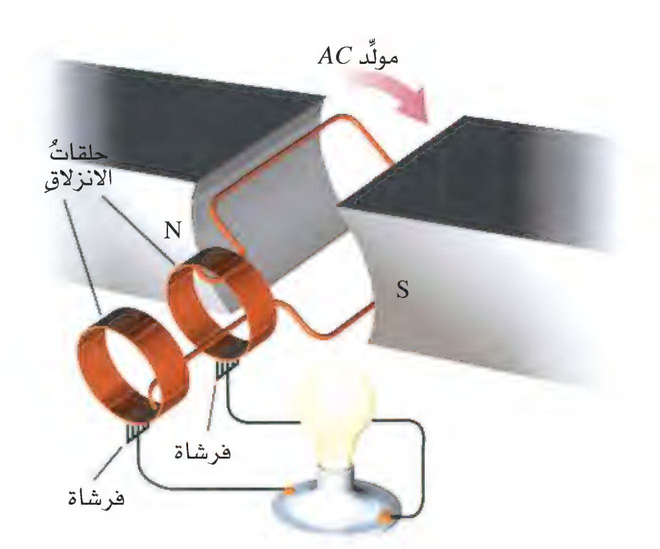
يمكنُ استعمالُ المقاوماتِ في تطبيقاتِ كلٍّ من دوائرِ التيّارِ المستمرِّ، أو التيّارِ المتناوبِ. فالمقاومُ يُقاومُ حركةَ الشحناتِ، بغضِّ النظرِ عمّا إذا كانَتْ حركتُها منتظمةً، أو كانَتْ تغيِّرُ اتِّجاهَها بشكلٍ دوريٍّ. فكما يصحُّ تعريفُ المقاومِ في دوائرِ التيّارِ المستمرِّ، يصحُّ أيضًا في دوائرِ التيّارِ المتناوبِ والقوى الدافعةِ الكهربائيَّةِ.

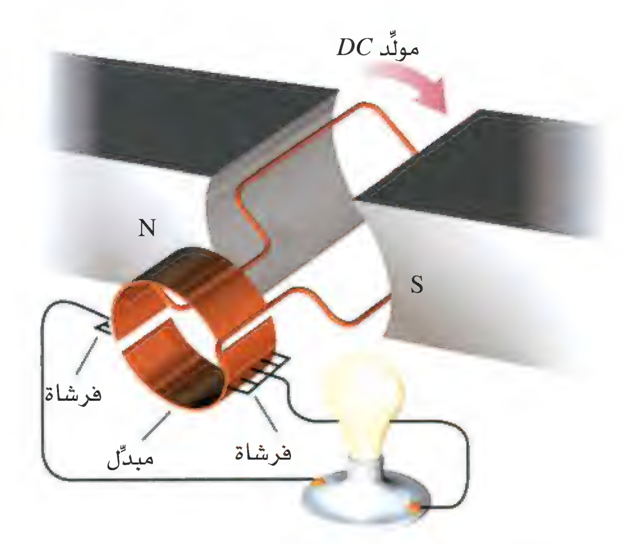
تحويلُ التيّارِ المتناوبِ إلى تيّارٍ مستمرٍّ

ينبغي أن تتحرَّكَ الحلقةُ الموصِّلةُ في مولِّدِ AC بحريَّةٍ، في المجالِ المغناطيسيِّ. كما ينبغي أن تكونَ دائمًا جزءًا من دائرةٍ كهربائيَّةٍ. من أجلِ تحقيقِ ذلك، يوصَّلُ طرفا الحلقةِ بحلقاتٍ أخرى موصِّلةٍ، تُسمّى حلقاتِ انزلاقٍ تؤدّي إلى دورانِ الحلقةِ الأساسيَّةِ. يتمُّ التوصيلُ مع الدائرةِ الخارجيَّةِ بوساطةِ شريطَيْ كرافيت ثابتَيْن يُسمّيان الفرشاتَيْن، حيثُ يتمُّ التوصيلُ عبرَهما للحلقتَيْن الانزلاقيَّتَيْن. بما أن التيّارَ يغيِّرُ اتِّجاهَه في الحلقةِ الأساسيَّةِ، فإن التيّارَ الخارجيَّ خلالَ الفرشاتَيْن يغيِّرُ اتِّجاهَه أيضًا.

بتعديلِ هذا التصميمِ قليلاً، يمكنُ تحويلُ مولِّدِ AC إلى مولِّدِ DC. لاحظْ في **الشكل 6-12** أن مكوِّناتِ مولِّدِ DC في معظمِها مكوِّناتُ مولِّدِ AC، ما عدا التوصيلَ للحلقةِ الدوّارةِ الذي يتمُّ عبرَ حلقةٍ انزلاقيَّةٍ واحدةٍ (مكوّنة من نصفَيْن معزولَيْن أحدهما عن الآخر) تُسمّى المبدِّلَ.

حينَ ينخفضُ التيّارُ إلى صفرٍ عندَ هذه النقطةِ من دورانِ الحلقةِ ويغيِّرُ اتِّجاهَه، يصبحُ كلُّ نصفٍ من المبدِّلِ على اتِّصالٍ بالفرشاةِ التي كانَتْ متَّصلةً بالنصفِ الآخرِ من



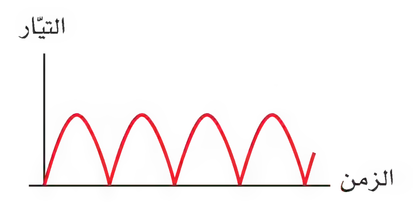


الشكل 12-6

مولّدُ AC البسيطُ (إلى اليسار) له تصميمٌ مشابهٌ لمولّدِ DC (إلى اليمين). تحوّلُ حلقاتُ الانزلاقِ المنفصلةُ التيّارَ المتناوبَ إلى تيّارٍ مستمرٍّ.

المبدِّلِ قبلاً. لذلك يغيِّرُ التيّارُ المعكوسُ أساسًا اتّجاهَهُ مرَّةً أخرى في الحلقةِ، ويعودُ إلى اتّجاهِهِ الأساسيِّ، على الرغمِ من هبوطِهِ من قيمتِهِ القصوى إلى الصفرِ. يوضحُ **الشكلُ 13-6** رسمًا للتيّارِ النبضيِّ المستمرِّ.

يمكنُ إنتاجُ تيّارٍ مستمرٍّ تمامًا باستعمالِ عدَّةِ حلقاتٍ ومبدِّلاتٍ موزَّعةٍ حولَ محورِ دورانِ مولِّدِ AC. يستعملُ هذا المولّدُ حلقاتٍ انزلاقيَّةً تحوِّلُ مخرجَ المولِّدِ باستمرارٍ إلى المبدِّلِ الذي ينتجُ ε قصوى. تُنتجُ عمليَّةُ التحويلِ هذه تيّارًا قليلَ التموُّجِ، وشبهَ مستمرٍّ.



الشكل 13-6

التيّارُ الناتجُ عن مولّدِ DC بحلقةٍ واحدةٍ، هو دالّةٌ جيبيَّةٌ يستبدلُ فيها بالجزءِ السالبِ جزءٌ معاكسٌ موجبٌ.

المحرِّكات

المحرِّكاتُ آلاتٌ تحوِّلُ الطاقةَ الكهربائيَّةَ إلى طاقةٍ ميكانيكيَّةٍ. فبدلاً من التيّارِ الذي تولِّدُهُ حلقةٌ تدورُ في مجالٍ مغناطيسيٍّ، تُزوَّدُ الحلقةُ بتيّارٍ بوساطةِ مصدرِ ε، بينما تؤدّي القوَّةُ المغناطيسيَّةُ على الحلقةِ إلى حركتِها الدورانيَّةِ (**الشكل 14-6**).

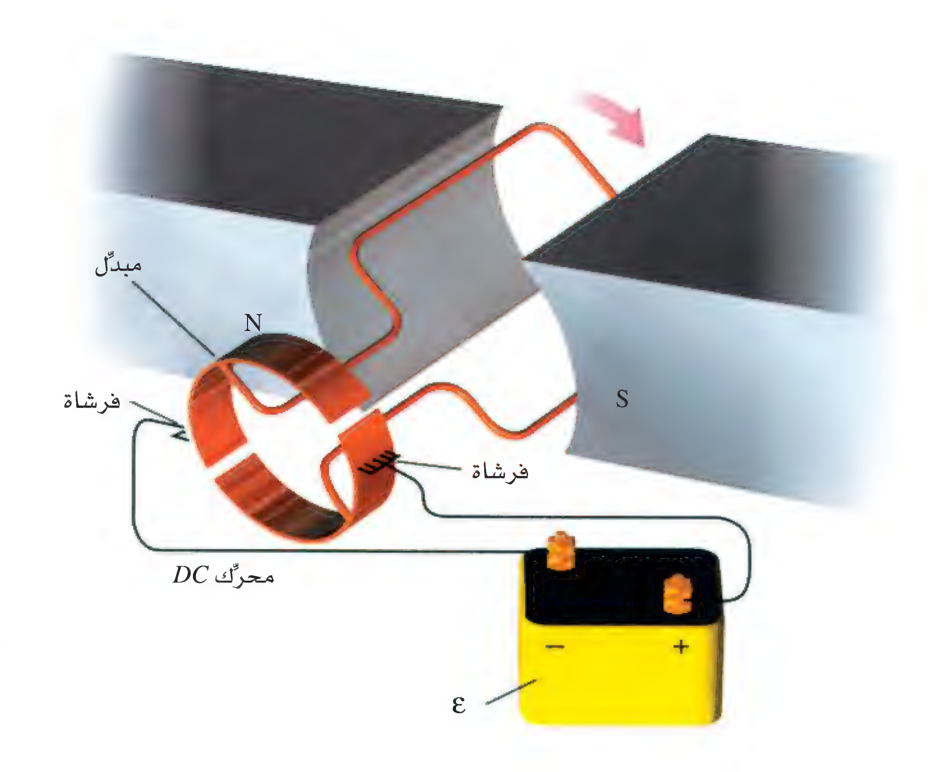
يشبهُ المحرِّكُ في تركيبِهِ مولِّدَ DC إلى حدٍّ بعيدٍ. يوضعُ ملفٌّ سلكيٌّ على عمودٍ دوّارٍ بينَ قطبَيْ مغناطيسٍ. تؤمِّنُ الفرشاتانِ الاتِّصالَ مع المبدِّلِ الذي يُغيِّرُ اتِّجاهَ التيّارِ في الملفِّ. يؤدّي هذا التناوبُ في اتِّجاهِ التيّارِ إلى تناوبٍ في المجالِ المغناطيسيِّ الناتجِ عن التيّارِ، وبالتالي يتنافرُ دائمًا مع المجالِ المغناطيسيِّ الثابتِ. لذلك يبقى كلٌّ من الملفِّ والعمودِ في حركةٍ دورانيَّةٍ متواصلةٍ.

يمكنُ للمحرِّكِ أن يبذلَ شغلاً ميكانيكيًّا، عندَما يُربطُ العمودُ المتَّصلُ بالملفِّ الدوّارِ مع جهازٍ خارجيٍّ. لدى دورانِ ملفِّ المحرِّكِ، تُنتجُ مَركَّبةُ المجالِ المغناطيسيِّ العموديَّةُ بداخلِهِ ε محتثَّةً تؤدّي إلى خفضِ التيّارِ في الملفِّ، وفقًا لقانونِ لنز، تُسمّى **القوَّةَ الدافعةَ الكهربائيَّةَ المحتثَّةَ المضادةَ** back emf.

القوَّةُ الدافعة الكهربائيَّة المحتثَّة المضادةُ

القوَّةُ الدافعةُ الكهربائيَّةُ المحتثَّةُ في ملفِّ محرِّكٍ، والتي تؤدّي إلى خفضِ التيّارِ فيه.

يزيدُ مقدارُ ε المضادةِ، كلّما ازدادَتْ وتيرةُ تغيُّرِ المجالِ المغناطيسيِّ. فكلما ازدادَتْ سرعةُ دورانِ الملفِّ، تزدادُ ε المضادَّةُ. يساوي فرقُ الجُهدِ الذي يؤمِّنُ التيّارَ للمحرِّكِ الفرقَ بينَ فرقِ الجُهدِ المطبَّقِ و ε المضادَّة. لذلك، ينخفضُ التيّارُ في الملفِّ نتيجةً لوجودِ ε المضادةِ. كلَّما كانَ دورانُ المحرِّكِ أسرعَ انخفضَت محصِّلةُ ε حولَ المحرِّكِ، والتيّارِ المارِّ في الملفِّ.

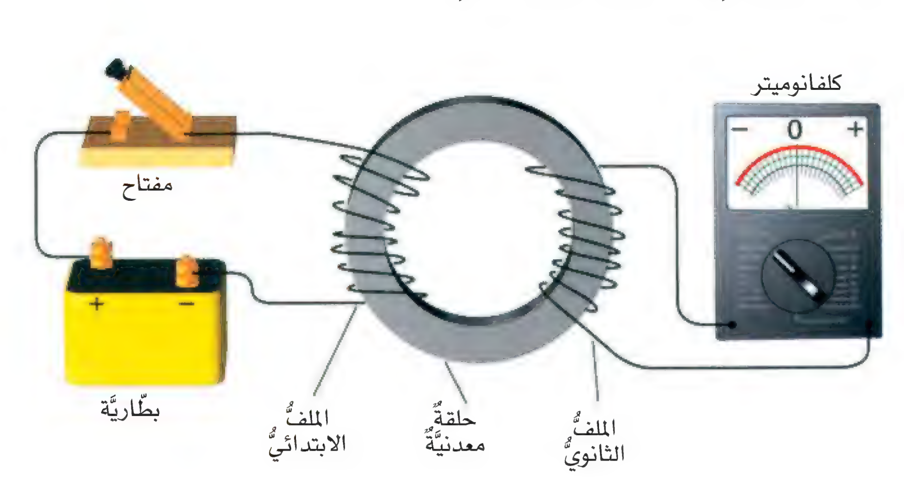


الشكل 6-14
في المحرِّك، يتفاعلُ التيّارُ المارُّ في الملفِّ مع المجالِ المغناطيسيِّ، ما يؤدّي إلى دورانِ الملفِّ والعمودِ الذي يحملُه.

الحثُّ المتبادَلُ

كانَ فاراداي أوّلَ من استعرضَ المبادئَ الأساسيَّةَ للحثِّ الكهرومغناطيسيِّ. استعملَ في تجربتِه الأولى، المشابهةِ لما في **الشكل 6-15**، ملفًّا متّصلاً بمفتاحٍ وبطّاريَّةٍ، بدلاً من المغناطيس، وذلك لإنتاجِ مجالٍ مغناطيسيٍّ. يُسمّى هذا الملفُّ الملفَّ الابتدائيَّ، وتُسمّى دائرتُه الدائرةَ الابتدائيَّةَ. يُقوّى المجالُ المغناطيسيُّ نتيجةً للخصائصِ المغناطيسيَّةِ للحلقةِ الحديديَّةِ، التي يُلفُّ الملفُّ حولَها.

يُلفُّ ملفٌّ آخرُ حولَ جزءٍ ثانٍ من الحلقةِ الحديديَّةِ، ويوصَّلُ بكلفانوميتر. تُحثُّ ε في هذا الملفِّ الذي يُسمّى الملفَّ الثانويَّ، عندَما يتغيَّرُ المجالُ المغناطيسيُّ في الملفِّ الابتدائيِّ. عندَما يُغلقُ المفتاحُ في الدائرةِ الابتدائيَّةِ، فإن مؤشّرَ الكلفانوميترِ ينحرفُ في الاتِّجاهِ المعاكسِ، ويعودُ مباشرةً إلى الصفرِ.



الشكل 6-15
يتمُّ في تجربةِ الحثِّ الكهرومغناطيسيِّ لفاراداي استعمالُ تيّارٍ متغيّرٍ في دائرةٍ لحثِّ تيّارٍ في دائرةٍ أخرى.

يمكنُ توقُّعُ مقدارِ القوَّةِ الدافعةِ الكهربائيَّةِ هذه بوساطةِ قانونِ فاراداي للحثِّ الكهرومغناطيسيِّ. كما يمكنُ إعادةُ كتابةِ قانون فاراداي، بحيثُ تتناسبُ ε المحتثَّةُ مع التيّارِ المتغيِّرِ في الملفِّ الابتدائيِّ. يعودُ ذلك إلى التناسُبِ الطرديِّ بين المجالِ المغناطيسيِّ الناتجِ عن تيّارِ الملفِّ والتيّارِ نفسِه. يكونُ شكلُ قانونِ فاراداي بدلالةِ التيّارِ الابتدائيِّ المتغيِّرِ، على النحوِ التالي:

$$\mathcal{E} = -N\frac{\Delta\Phi_{\text{المغناطيسي}}}{\Delta t} = -M\frac{\Delta I}{\Delta t}$$

الحثُّ المُتبادَلُ

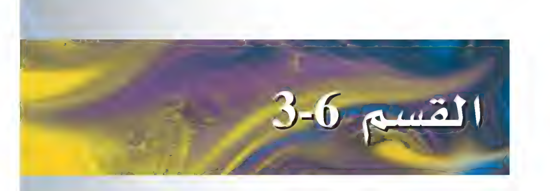
عمليَّةُ تولُّدِ قوَّةٍ دافعةٍ كهربائيَّةٍ في إحدى الدائرتَيْن نتيجةَ تغيُّرِ شدَّةِ التيّارِ في الدائرةِ الأخرى.

يُسمّى الثابتُ M معاملَ **الحثِّ المتبادلِ** mutual inductance بين ملفَّيِ النظامِ. يعتمدُ الحثُّ المتبادَلُ على الخصائصِ الهندسيَّةِ للملفَّيْن، وعلى اتِّجاهِهما الواحدِ بالنسبةِ إلى الآخرِ. يمكنُ أيضًا لتيّارٍ متغيِّرٍ في الملفِّ الثانويِّ أن يحثَّ ε في الملفِّ الابتدائيِّ. في الحقيقةِ، عندَما يتغيَّرُ التيّارُ في الملفِّ الثاني، تخضعُ ε المحتثَّةُ في الملفِّ الأوَّلِ لعلاقةٍ مشابهةٍ، وبقيمةِ M نفسِها.

يمكنُ تغييرُ القوَّةِ الدافعةِ الكهربائيَّةِ المحتثَّةِ في الدائرةِ الثانويَّةِ بتغييرِ عددِ لفّاتِ السلكِ في الملفِّ الثانويِّ. يُعتمدُ ذلكَ كأساسٍ لجهازٍ مهمٍّ جدًّا، هو المحوِّلُ.

مراجعةُ القسم 6-2

1. ملفٌّ مؤلَّفٌ من 37 لفَّةً، ومساحةُ مقطعِه $0.33\ \text{m}^2$ يدورُ بسرعةٍ زاويَّةٍ 281 rad/s. محورُ دورانِ الملفِّ عموديٌّ على مجالٍ مغناطيسيٍّ منتظمٍ شدَّتُه 0.035 T. ما القيمةُ القُصوى للقوَّةِ الدافعةِ الكهربائيَّةِ المُحتثَّةِ؟
2. لملفِّ مولِّدٍ 25 لفَّةً من السلكِ، مساحةُ مقطعِها $36\ \text{cm}^2$. القيمةُ القُصوى للقوَّةِ الدافعةِ الكهربائيَّةِ الناتجةِ في المولِّدِ هي 2.8 V عندَ تردُّدِ 60.0 Hz. ما مقدارُ المجالِ المغناطيسيِّ الذي يدورُ الملفُّ فيه؟
3. بيِّنْ ما يحدثُ إذا لم يُستعملِ المبدِّلُ في المحرِّكِ.
4. **تفكيرٌ ناقدٌ:** افترضْ أن مركزَيْ ملفَّيْن دائريَّيْن تفصلُ بينَهما مسافةٌ ثابتةٌ. أيُّ اتِّجاهٍ نسبيٍّ للملفَّيْن يعطي قيمةً قصوى للحثِّ المتبادلِ؟ أيُّ اتِّجاهٍ نسبيٍّ يُعطي قيمةً دنيا للحثِّ المتبادلِ؟



دوائرُ التيّارِ المتناوبِ (AC) والمحوِّلاتُ
AC Circuits and Transformers

6-3 أهدافُ القسمِ

- يميِّزُ بينَ قيمةِ جذرِ متوسِّطِ المربَّعاتِ (القيمِ الفعّالة) والقيمِ القُصوى للتيّارِ وفرقِ الجُهدِ.
- يحلُّ مسائلَ تتعلَّقُ بالقيمِ الفعّالةِ والقيمِ القُصوى للتيّارِ والقوّةِ الدافعةِ الكهربائيَّةِ في دوائرِ التيّارِ المتناوبِ.
- يطبِّقُ قانونَ أوم على دوائرِ التيّارِ المتناوبِ.
- يمثِّلُ بيانيًّا المتَّجهاتِ الطوريَّةَ للتيّارِ وفرقَ الجُهدِ.
- يوضحُ كيفَ يحدثُ الرنينُ في دوائرِ التيّارِ المتناوبِ.
- يطبِّقُ معادلةَ المحوِّلاتِ لحلِّ مسائلَ تتعلَّقُ بالمحوِّلاتِ الرافعةِ والمحوِّلاتِ الخافضةِ.
- يحسبُ كفاءةَ نقلِ الطاقةِ الكهربائيَّةِ.

التيّارُ الفعّالُ

علمْتَ من القسمِ السابقِ أن المولِّدَ الكهربائيَّ يستطيعُ إنتاجَ تيّارٍ متناوبٍ يتغيَّرُ مع مرورِ الزمنِ، كالدالَّةِ الجيبيَّةِ. تستعملُ المحطَّاتُ التجاريةُ لإنتاجِ الطاقةِ المولِّداتِ لتأمينِ الطاقةِ للأدواتِ الكهربائيَّةِ في البيوتِ والشركاتِ. سندرسُ في هذا القسمِ خصائصَ دائرةِ التيّارِ المتناوبِ البسيطةِ.

كما في حالةِ دوائرِ التيّارِ المستمرِّ، نتحدَّثُ أيضًا في دوائرِ التيّارِ المتناوبِ عن مقاوَماتٍ وتيّارٍ كهربائيٍّ وفرقِ جُهدٍ. القوَّةُ الدافعةُ الكهربائيَّةُ في دوائرِ التيّارِ المتناوبِ تشبهُ فرقَ الجُهدِ في دوائرِ التيّارِ المستمرِّ. إحدى طرائقِ قياسِ هذه المتغيِّراتِ الثلاثةِ في الدائرةِ، هي استعمالُ مقياسٍ كهربائيٍّ رقميٍّ متعدِّدِ القياساتِ، كما في **الشكل 6-16**. يمكنُ قياسُ كلٍّ من المقاومةِ والتيّارِ و ε، باختيارِ مفتاحِ الضبطِ المناسبِ على المقياسِ، والمكانِ المناسبِ في الدائرةِ.



الشكل 6-16
يمكنُ قياسُ القيمةِ الفعّالةِ لتيّارٍ وفرقِ جُهدٍ متناوبَيْنِ، باستعمالِ مقياسٍ رقميٍّ متعدِّدِ القياساتِ.

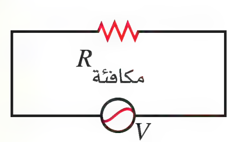
التيّارُ الفعّالُ والقوّةُ الدافعةُ الكهربائيَّةُ الفعّالةُ في دوائرِ التيّارِ المتناوبِ

تتألَّفُ دائرةُ التيّارِ المتناوبِ من مجموعةِ عناصرَ، مع مولِّدٍ أو مصدرٍ لتيّارٍ متناوبٍ. رأيْنا من قبلُ أن ε الناتجةَ عن مولِّدِ تيّارٍ متناوبٍ تكونُ جيبيَّةَ الشكلِ، وتتغيَّرُ مع الزمنِ. يمكنُ كتابةُ ε المحتثَّةِ (V) بدلالةِ الزمنِ والقيمةِ القصوى (V_m) كما يلي:

$$V = V_m \sin(\omega t)$$

يمكنُ التعاملُ مع دائرةِ تيّارٍ متناوبٍ بسيطةٍ، كمقاوَمةٍ مكافئةٍ ومصدرِ تيّارٍ كهربائيٍّ. في رسمِ الدائرةِ الكهربائيَّةِ، نمثِّلُ مصدرَ التيّارِ المتناوبِ بالرمزِ ⏦، كما في **الشكل 6-17**. التيّارُ اللحظيُّ الذي يتغيَّرُ بتغيُّرِ فرقِ الجُهدِ يمكنُ حسابُه باستعمالِ تعريفِ المقاوَمةِ. يرتبطُ التيّارُ اللحظيُّ بقيمةِ التيّارِ القُصوى عبرَ العلاقةِ التاليةِ:

$$I = I_m \sin(\omega t)$$



الشكل 6-17
دائرةُ تيّارٍ متناوبٍ ممثّلةٌ بمصدرِ تيّارٍ متناوبٍ، ومقاومةٍ مكافئةٍ.

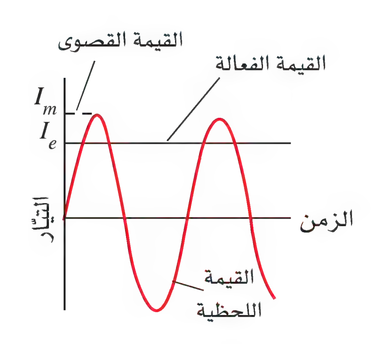
إن المعدّلَ الزمني الذي تتحوَّلُ فيه الطاقةُ الكهربائيَّةُ إلى طاقةٍ داخليَّةٍ في المقاومةِ (القدرة P) له الشكلُ نفسُه، كما في حالةِ التيّارِ المستمرِّ. والطاقةُ الكهربائيَّةُ المتحوِّلةُ إلى طاقةٍ داخليَّةٍ، في مقاومةٍ عندَ لحظةٍ ما، تتناسبُ مع مربَّعِ القيمةِ اللحظيةِ للتيّارِ، ولا تعتمدُ على اتِّجاهِه في الدائرةِ. إلاّ أن الطاقةَ التي ينتجُها تيّارٌ متناوبٌ قيمتُه القصوى I_m لا تساوي الطاقةَ التي ينتجُها تيّارٌ مستمرٌّ له القيمةُ القصوى I_m نفسُها. تختلفُ الطاقتانِ، لأنّ التيّارَ المتناوبَ تكونُ قيمتُهُ اللحظيَّةُ خلالَ دورتِهِ مساويةً لقيمتِه القصوى في لحظةٍ واحدةٍ فقط.

القيمةُ الفعّالةُ للتيّارِ

قيمةُ التيّارِ المتناوبِ الذي يولِّدُ ما يولِّدُهُ تيّارٌ مستمرٌّ من تأثيرٍ حراريٍّ في الفترةِ نفسِها.

أحدُ القياساتِ المهمَّةِ للتيّارِ المتناوبِ هو قياسُ **القيمةِ الفعّالةِ للتيّارِ** effective current. تمثِّلُ القيمةُ الفعّالةُ للتيّارِ المتناوبِ القيمةَ نفسَها للتيّارِ المستمرِّ الذي يؤدّي إلى هدرِ الطاقةِ نفسِها في مقاومٍ، خلالَ دورةٍ كاملةٍ للتيّارِ المتناوبِ. تُسمّى هذه القيمةُ للتيّارِ المتناوبِ القيمةَ الفعّالةَ I_e.

يظهرُ **الشكلُ 18-6** رسمًا بيانيًّا يقارنُ بينَ القيمةِ اللحظيَّةِ والقيمةِ الفعّالةِ للتيّارِ المتناوبِ. كما يلخِّصُ **الجدولُ 2-6** ما في هذا الفصلِ من تعابيرَ ورموزٍ تتعلَّقُ بكميّاتِ التيّارِ المتناوبِ.



الشكل 18-6

القيمةُ الفعّالةُ للتيّارِ I_e أكبرُ قليلاً من ثلثَي القيمةِ القُصوى للتيّارِ I_m.

إن معادلةَ القدرةِ المتوسِّطةِ في دائرةِ تيّارٍ متناوبٍ لها الشكلُ نفسُه لما في دائرةِ التيّارِ المستمرِّ، سوى أن قيمةَ التيّارِ المستمرِّ I يُستبدلُ بها I_e قيمةُ التيّارِ الفعّالةُ.

$$P = (I_e)^2R$$

تتطابقُ هذه العلاقةُ مع العلاقةِ المستخدمةِ في حالةِ التيّارِ المستمرِّ. إلاّ أن القدرةَ المهدورةَ في دائرةِ تيّارٍ متردِّدٍ تساوي نصفَ القدرةِ المهدورةِ في دائرةِ التيّارِ المستمرِّ، إذا استبدلنا بالتيّارِ المستمرِّ القيمةَ القصوى I_m.

$$P = (I_e)^2R = \frac{1}{2}(I_m)^2R$$

يمكنُكَ أن تلاحظَ، من خلالِ هذه العلاقةِ، أن I_e ترتبطُ بـ I_m للتيّارِ المتناوبِ، من خلالِ المعادلةِ التاليةِ:

$$(I_e)^2 = \frac{(I_m)^2}{2}$$

$$I_e = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

تفيدُ هذه المعادلةُ أن لتيّارٍ متناوبٍ قيمتُه القصوى $I_m = 5A$ تأثيرًا حراريًّا في مقاومٍ، كتأثيرِ تيّارٍ مستمرٍّ قيمتُه $\frac{5}{\sqrt{2}}$ A، أو حوالي 3.5 A.

كذلك يُعبَّرُ عن قيمِ ε المتناوبة بطريقةٍ أفضل، من خلالِ قيمتِها الفعّالةِ، حيث تُشبهُ العلاقةُ بين القيمِ القصوى والقيمِ الفعّالةِ العلاقةَ القائمةَ بينَ التيّاراتِ.

$$V_e = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

الجدول 2-6 المصطلحاتُ المُستعملةُ في دوائرِ التيّارِ المتناوبِ

	ε المطبَّقةُ أو المحتثَّةُ	التيّار
القيمةُ اللحظيَّةُ	V	I
القيمةُ القصوى	V_m	I_m
القيمةُ الفعّالةُ	$V_e = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$	$I_e = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$

مثال 6 (ج)

القيمةُ الفعّالةُ للتيّارِ والقوّةِ الدافعةِ الكهربائيَّةِ

المسألة

مولّدٌ قوّتُهُ الدافعةُ الكهربائيَّةُ القصوى 205 V يوصَّلُ مع مقاومٍ 115 Ω. احسبِ القيمةَ الفعّالةَ لفرقِ الجُهدِ. جدِ القيمةَ الفعّالةَ للتيّارِ في المقاومِ. ثم احسُبْ I_m لتيّارِ الدائرةِ المتناوبِ.

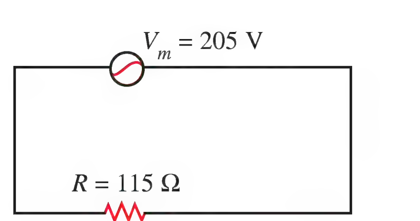
الحــلّ

1. أعرِّف

المعطى: $V_m = 205\ V$ $\quad R = 115\ \Omega$

المجهول: $V_e = ?$ $\quad I_e = ?$ $\quad I_m = ?$

الرسم:



2. أخطِّط

أختارُ معادلةً أو موقفًا: أستعمل معادلةَ القيمةِ الفعّالةِ لفرقِ الجُهدِ، كي أحسبَ V_e.

$$V_e = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

أُعيدُ ترتيبَ معادلةِ تعريفِ المقاومةِ، كي أحسبَ I_e.

$$I_e = \frac{V_e}{R}$$

أستعملُ معادلةَ I_e كي أحسبَ I_m.

$$I_e = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

أعيدُ ترتيبَ المعادلةِ لأعزلَ المجهولَ:

أُعيدُ ترتيبَ المعادلةِ التي تربطُ I_e بـ I_m لأتمكّنَ من حسابِ I_m.

$$I_m = I_e\sqrt{2}$$

> **ملاحظة**
> بما أن ε تُقاسُ بالفولت، فإن القيمةَ القصوى لـ ε غالبًا ما تُختصرُ بـ V_m، والقيمةَ الفعّالةَ لـ ε تُختصرُ بـ V_e.

3. أحسب

أعوِّضُ القيمَ في المعادلةِ وأحلُّ:

$$V_e = \frac{I}{\sqrt{2}}(205\ V) = \boxed{145\ V}$$

$$I_e = \frac{145\ V}{115\ \Omega} = \boxed{1.26\ A}$$

$$I_m = 1.26\ A \times \sqrt{2} = \boxed{1.78\ A}$$

4. أقيِّم

إن القيمةَ الفعّالةَ للقوَّةِ الدافعةِ الكهربائيَّةِ والتيّارِ أكبرُ قليلاً من ثلثَيِ القيمِ القصوى، كما هو متوقَّعٌ.

تطبيق 6 (ج)

القيمةُ الفعّالةُ للتيّارِ والقوّةِ الدافعةِ الكهربائيّةِ

1. تمَّ توصيلُ محمصةِ خبزٍ بمصدرٍ متناوبٍ له قيمة فعّالةٌ تساوي $110\ V$. يُصمَّمُ سخّانُ المحمصةِ ليعطيَ تيّارًا قيمتُه القصوى $10.5\ A$. جِدْ ما يلي:
أ. القيمةَ الفعّالةَ للتيّارِ في السخّانِ.
ب. مقاومةَ السخّانِ.

2. مضخّمٌ صوتيٌّ ينتج $\mathcal{E}$ بقيمةٍ فعّالةٍ $15.0\ V$. تمَّ توصيلُ مكبّرٍ مقاومتُه $10.4\ \Omega$ بالمضخِّمِ. ما القيمةُ الفعّالةُ للتيّارِ في المكبّرِ؟ ما أقصى قيمةٍ للتيّارِ والقوّةِ الدافعةِ الكهربائيّةِ؟

3. مولِّدُ تيّارٍ متناوبٍ له $\mathcal{E}$ قيمتُها القصوى $155\ V$.
أ. جِدِ القيمةَ الفعّالةَ للقوّةِ الدافعةِ الكهربائيّةِ الناتجةِ.
ب. جِدِ القيمةَ الفعّالةَ للتيّارِ في الدائرةِ، عندَ وصلِ المولّدِ بمقاومٍ $53\ \Omega$.

4. تبلغُ أقصى قيمةٍ لـ $\mathcal{E}$ يمكنُ تطبيقُها حول طرفَيْ مكثِّفٍ $451\ V$. ما أكبرُ قيمةٍ فعّالةٍ لـ $\mathcal{E}$ يمكنُ تطبيقُها للمكثِّفِ دونَ أن يتعطَّلَ؟

تطبيقُ قانونِ أوم على دوائرِ التيّارِ المتناوب

المقاومةُ الصرفةُ

مقاومةٌ ليسَ لها حثٌّ ذاتيٌّ $(L = 0)$.

دائرةُ المقاومةِ الصرفةِ (الأوميّةِ)

المقاومةُ الصرفةُ pure resistor هي مقاومةٌ ليسَ لها حثٌّ ذاتيٌّ $(L = 0)$. يتمُّ في **الشكل 6-19** توصيلُ مقاومةٍ صرفةٍ بمصدرِ جُهدٍ كهربائيٍّ ذي تردُّدٍ في حدودِ $0.1\ Hz$، بحيثُ نختارُ فولتميترًا وأميّترًا بمؤشّرٍ صفريٍّ وسطيٍّ. لاحظْ أن قراءةَ كلٍّ من الفولتميترِ والأميّتر تزدادُ معًا، وتتناقصُ معًا، أي أن فرقَ الجُهدِ وشدَّةَ التيّارِ متَّفقانِ في الطورِ. وهذا يعني أن مقدار المقاومة الأومية لا يعتمد على تردّد الفولتية.

يمكنُكَ تمثيلُ فرقِ الجُهدِ وشدَّةِ التيّارِ بيانيًّا، كما في **الشكل 6-20** (أ)، حيث تلاحظُ أن التغيُّرَ جيبيٌّ، وأن ωt زاويةُ الطورِ للمصدرِ V بعد زمن t. كما يمكنُكَ الاستنتاجُ أن شدَّةَ التيّارِ وفرقَ الجُهدِ متَّفقانِ في الطورِ من خلالِ التمثيلِ الطوريِّ الاتِّجاهيِّ لكلٍّ منهما. كما في **الشكل 6-20** (ب). ويمكنُ إيجادُ المقاومةِ الصرفةِ في أيَّةِ لحظةٍ من إحدى العلاقاتِ التاليةِ:

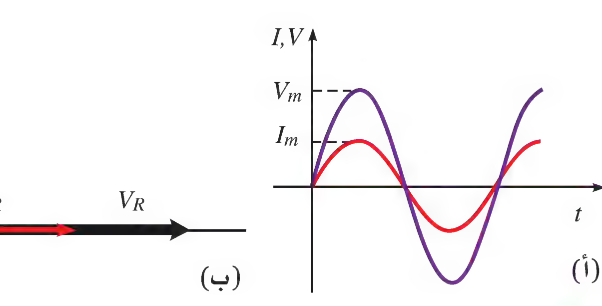
$$R = \frac{V_m}{I_m} = \frac{V_R}{I_R} = \frac{V_e}{I_e}$$

R

$V_R = V_m \sin(\omega t)$

$I_R = I_m \sin(\omega t)$

الشكل 6-19
دائرةُ مقاومةٍ صرفةٍ بمصدرِ جُهدٍ متناوبٍ.



الشكل 6-20
شدَّةُ التيّارِ وفرقُ الجُهدِ حولَ طرفَيْ مقاومةٍ في دائرةِ تيّارٍ متناوبةٍ يكونُ لهما الطورُ نفسُه.
(أ) V_R و I_R بدلالةِ الزمنِ. (ب) (التمثيلُ الطوريُّ الاتّجاهي لكلٍّ من I_R ، V_R) تُعطى V_R بدلالةِ I_R وفقَ العلاقةِ $V_R = RI_R$.

مثال 6 (د)

قانونُ أوم لدائرةِ مقاومةٍ صرفةٍ

المسألة

مدفأةٌ كهربائيَّةٌ تعملُ بفرقِ جُهدٍ متناوبٍ قيمته القصوى $V_m = 282.8\ V$. إذا كانَتْ مقاومةُ المدفأةِ تُساوي $500\ \Omega$، فاحسبِ الطاقةَ الحراريَّةَ المتولِّدةَ إذا مرَّ التيّارُ الكهربائيُّ في المدفأةِ لمدَّةِ نصفِ ساعةٍ. وما القيمةُ الفعّالةُ للتيّارِ؟ اعتبرْ $\sqrt{2} = 1.414$.

الحـــلّ

1. أعرِّف

المعطى: $t = 1800\ s$ $\quad R = 500\ \Omega$ $\quad V_m = 282.8\ V$

$$V_e = \frac{1}{\sqrt{2}} V_m = \frac{282.8}{1.414} = 200\ V$$

المجهول: $E = ?$ $\quad I_e = ?$

2. أخطِّط

أختارُ معادلةً أو موقفًا: أكتبُ معادلةَ الطاقةِ الحراريَّةِ المهدورةِ في مقاومةٍ R:

$$E = \frac{V_e^2}{R} t$$

وكذلك معادلةَ القيمةِ الفعّالةِ للتيّارِ بدلالةِ فرقِ الجُهدِ الفعّالِ $I_e = \frac{V_e}{R}$

3. أحسب

أعوِّضُ القيمَ في المعادلةِ وأحسبُ:

$$E = \frac{V_e^2}{R} t = \frac{(200)^2}{500} \times 1800 = \boxed{144 \times 10^3\ J}$$

$$I_e = \frac{V_e}{R} = \frac{200\ V}{500\ \Omega} = 0.4\ A$$

أو

$$I_m = \frac{V_m}{R} = \frac{282.8\ V}{500\ \Omega} = 0.5656\ A$$

$$I_e = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{0.5656\ A}{1.414} = \boxed{0.4\ A}$$

تطبيق 6 (د)

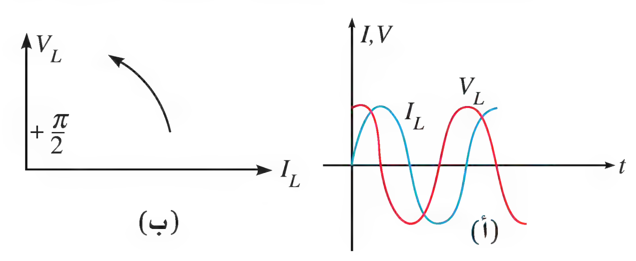
قانونُ أوم لدائرةِ مقاومةٍ صرفةٍ

1. يوصَّلُ مقاومٌ $20\ \Omega$ حولَ طرفَيْ مصدرِ تيّارٍ متناوبٍ قيمتُه الفعّالةُ $10\ V$، احسبِ القيمةَ القصوى والقيمةَ الفعّالةَ للتيّارِ المارِّ في المقاومِ.
2. إذا كان تردُّد المصدرِ في السؤالِ 1 يبلغُ $50\ Hz$، اكتبِ المعادلةَ اللحظيَّةَ لكلٍّ من التيّارِ وفرقِ الجُهدِ حولَ طرفَيْ المقاومِ.
3. احسبْ كمِّيّةَ الطاقةِ الضائعةِ في المقاومِ في السؤالِ 2، خلالَ 5 دقائقَ.

دائرةُ محثٍّ نقيٍّ

المحثُّ النقيُّ هو أيُّ ملفٍّ ذي معامل حثٍّ ذاتيٍّ، وليسَ له مقاومةٌ أوميَّةٌ $(R = 0)$. في **الشكل 6-21** يتمُّ توصيلُ ملفٍّ حثٍّ نقيٍّ بمصدرِ جُهدٍ كهربائيٍّ تردُّدُه في حدودِ $0.1\ \text{Hz}$، وبحيثُ تختارُ فولتميترًا وأمّيترًا، وكلٌّ منهما ذو مؤشّرٍ صفريٍّ وسطيٍّ.
تجدُ، في اللحظةِ التي تبلغُ فيها قراءةُ الفولتميترِ قيمتَها العظمى، أن قراءةَ الأمّيترِ لاتزالُ منعدمةً. وعندَما تصبحُ قراءةُ الفولتميترِ صفرًا، تصبحُ قراءةُ الأمّيترِ عند نهايتِها العظمى. أي إن فرقَ الجُهدِ يتقدَّمُ على التيّارِ بالطورِ بمقدارِ $(\frac{\pi}{2})$. ويمكنُ تمثيلُ ذلك بيانيًّا، كما في **الشكل 6-22** الذي يوضحُ التمثيلَ الطوريَّ الاتّجاهيَّ لكلٍّ من V_L وI_L.

الشكل 6-21
دائرةٌ لملفٍّ نقيٍّ بمصدرِ تيّارٍ متناوبٍ.



الشكل 6-22
شدَّةُ التيّارِ وفرقُ الجُهدِ حولَ طرفَيْ ملفٍّ نقيٍّ في دائرةِ تيّارٍ متناوبٍ. (أ) V_L و I_L بدلالةِ الزمنِ، (ب) V_L بدلالةِ I_L حيث تتقدَّمُها بطورِ $\frac{\pi}{2}$.

في هذهِ الحالةِ يمكنُ حسابُ القيمِ اللحظيَّةِ لكلٍّ من فرقِ الجُهدِ وشدَّةِ التيّارِ المتناوبَيْنِ بالمعادلتَيْنِ التاليتَيْنِ:

$$V_L = V_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

$$I_L = I_m \sin(\omega t)$$

تُعرَّفُ **المانعةُ الحثيَّةُ** inductive impedance X_L التي يبديها الملفُّ لسَريانِ التيّارِ الكهربائيِّ بالعلاقةِ التاليةِ في دائرةٍ تحوي ملفًّا حثيًّا نقيًّا فقط:

$$X_L = \frac{V_m}{I_m} = \frac{V_e}{I_e} = \omega L = 2\pi f L$$

وتنشأُ هذه المانعةُ عن القوّةِ الدافعةِ الكهربائيَّةِ المتولِّدةِ في الملفِّ.

المانعةُ الحثيَّةُ
نسبةُ القيمةِ القصوى لفرقِ الجُهدِ حولَ طرفَيْ ملفٍّ حثّيٍّ نقيٍّ إلى القيمةِ القصوى للتيّارِ المارِّ فيه، في دائرةِ تيّارٍ متناوبٍ.

مثال 6 (هـ)

قانونُ أوم لملفٍّ نقيٍّ

المسألة

ملفٌّ معاملُ حثِّهِ الذاتيِّ L يساوي $0.2\ \text{H}$، ومقاومتُه الأوميَّةُ مهملةٌ، وصلَ بمصدرِ جُهدٍ متناوبٍ، تردُّدُه $50\ \text{Hz}$. احسبِ المانعةَ الحثيَّةَ للملفِّ والشدَّةَ الفعّالةَ للتيّارِ المارِّ فيه إذا كانَ فرقُ الجُهدِ الفعّالُ $125.6\ \text{V}$. اكتبْ معادلتَيْ شدَّةِ التيّارِ المارِّ بالملفِّ وفرقِ الجُهدِ اللحظيَّيْنِ بين طرفَيْه بدلالةِ الزمنِ.

الحــلّ

1. أعرِّف

المعطى: $L = 0.2\ \text{H}$ $\quad f = 50\ \text{Hz}$

المجهول: $X_L = ?$ ، $I_e = ?$ ، $I_L = ?$ ، $V_L = ?$

2. أخطِّط

أختارُ معادلةً أو موقفًا: أكتبُ معادلتَيْ $X_L = 2\pi f L$ و $I_e = \frac{V_e}{X_L}$

3. أحسب

أوّلاً: $X_L = 2\pi f L$

$$X_L = 2 \times 3.14\ (50\ \text{Hz})(0.2\ \text{H}) = \boxed{62.8\ \Omega}$$

ثانيًا: $I_e = \frac{V_e}{X_L}$

$$I_e = \frac{125.6\ \text{V}}{62.8\ \Omega} = \boxed{2\ \text{A}}$$

$$I_L = I_m \sin(\omega t)$$

$$I_m = I_e\sqrt{2} = 2\sqrt{2}\ \text{A}$$

$$\omega = 2\pi f = 100\pi\ \text{rad/s}$$

معادلةُ التيّارِ اللحظيِّ:

$$I_L = \boxed{2\sqrt{2}\sin(100\pi t)}$$

معادلةُ فرقِ الجُهدِ اللحظيِّ:

$$V_L = V_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

$$V_m = V_e\sqrt{2} = 125.6\sqrt{2}\ \text{V}$$

$$V_L = \boxed{125.6\sqrt{2}\sin\left(100\pi t + \frac{\pi}{2}\right)}$$

تطبيق 6 (هـ)

قانونُ أوم لملفٍّ نقيٍّ

1. احسبِ الممانعةَ الحثّيَّةَ لملفٍّ مهمل المقاومة معاملُ حثِّهِ الذاتيِّ 0.04 H وموصولٌ بمصدرٍ تردُّده 100 Hz.
2. مصدرُ تيّارٍ متناوبٍ فرقُ جُهدِهِ اللحظيُّ $V = 10\sin(50\pi t)$ يزوِّدُ ملفًّا مهمل المقاومة معاملُ حثِّه الذاتيِّ 0.1 H. جدِ القيمةَ القصوى للتيّارِ المارِّ في الملفِّ والفرقَ في الطورِ بينَ التيّارِ وفرقِ الجُهدِ.

دائرةُ المكثِّفِ

في **الشكل 6-23** يتمُّ توصيلُ مكثِّفٍ في دائرةٍ حيثُ يكونُ تردُّدُ المصدرِ في حدودِ 0.1 Hz، وبحيثُ نختارُ فولتميترًا أو أمّيترًا صُفِّرَ تدريجُ كلٍّ منهما في الوسطِ.

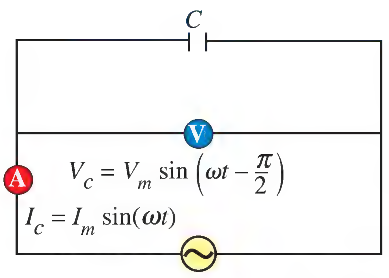
تبقى قراءةُ الفولتميترُ صفرًا حتى تبلغَ قراءةُ الأمّيترِ القيمةَ العظمى، وتصبحَ قراءةُ الفولتميترِ القيمةَ العظمى عندَما تصبحُ قراءةُ الأمّيترِ صفرًا.

نستنتجُ أن فرقَ الجُهدِ يتأخَّرُ عن التيّارِ في الطورِ في هذه الحالةِ بمقدارِ $\left(\frac{\pi}{2}\right)$.

ويمكنُ حسابُ القيمِ اللحظيَّةِ لكلٍّ من فرقِ الجُهدِ وشدَّةِ التيّارِ بالمعادلتَيْنِ التاليتَيْنِ:

$$V_c = V_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$I_c = I_m \sin(\omega t)$$



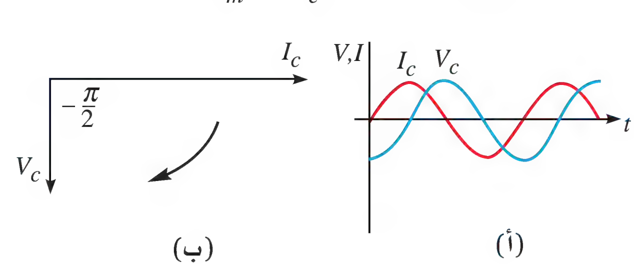
الشكل 6-23
دائرةُ تيّارٍ متناوبٍ لمكثِّفٍ.

ويمثِّلُ كلٌّ منهما في **الشكل 6-24** (أ). تسمّى ممانعةُ المكثِّفِ لمرورِ التيّارِ المتناوبِ في دائرتِه، **الممانعةَ السعويَّةَ** capacitive impedance X_c حيث:

$$X_c = \frac{V_m}{I_m} = \frac{V_e}{I_e} = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$$

المُمانعةُ السعويَّةُ

نسبةُ القيمةِ القصوى لفرقِ الجُهدِ حولَ طرفَيْ مكثِّفٍ إلى القيمةِ القصوى للتيّارِ في دائرةِ تيّارٍ متناوبٍ.



الشكل 6-24
شدَّةُ التيّارِ وفرقُ الجُهدِ حولَ طرفَيْ مكثِّفٍ في دائرةِ تيّارٍ متناوبٍ.
(أ) V_c و I_c بدلالةِ الزمنِ. (ب) V_c بدلالةِ I_c حيثُ تتأخَّرُ عنها بطورِ $\frac{\pi}{2}$.

مثال 6 (و)

قانونُ أوم لدائرةِ المكثِّفِ

المسألة

مصدرُ جُهدٍ تردُّدُه $\frac{100}{\pi}$ Hz وفرقُ الجُهدِ الفعّالُ بينَ طرفَيْه 200 V، وصِّلَ مع مكثِّفٍ كهربائيٍّ سعتُه 200 μF. احسبِ الممانعةَ السعويَّةَ للمكثِّفِ، وشدَّةَ التيّارِ الفعّالِ في الدائرةِ، والقيمةَ القصوى لكمّيَّةِ الشحنةِ التي يختزنُها المكثِّفُ.

الحلّ

1. أعرِّف

المعطى: $f = \frac{100}{\pi}$ Hz $\quad V_e = 200$ V $\quad C = 200$ μF

المجهول: $X_c = ?$ ، $I_e = ?$ ، $q_m = ?$

2. أخطِّط

أختارُ معادلةً أو موقفًا: أستعملُ المعادلاتِ:

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} \ ; \ I_e = \frac{V_e}{X_c} \ ; \ q_m = V_m \cdot C$$

3. أحسب

أعوِّضُ في المعادلاتِ وأحلّ:

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC}$$

$$X_c = \frac{1}{2\pi\left(\frac{100}{\pi}\text{ Hz}\right)\left(200 \times 10^{-6}\text{ F}\right)} = \boxed{25\ \Omega}$$

$$I_e = \frac{V_e}{X_L}$$

$$I_e = \frac{200\text{ V}}{25\ \Omega} = \boxed{8\text{ A}}$$

$$q_m = V_m \cdot C = \left(200\sqrt{2}\text{ V}\right)\left(200 \times 10^{-6}\text{ F}\right)$$

$$q_m = 4\sqrt{2} \times 10^{-2}$$

$$q_m = \boxed{5.65 \times 10^{-2}\text{ C}}$$

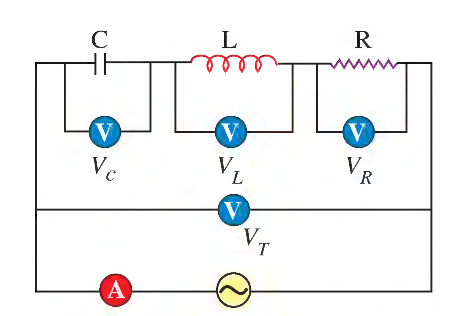
تطبيق 6 (و)

قانونُ أوم لدائرةِ المكثِّفِ

1. احسبِ الممانعةَ السعويَّةَ لمكثِّفٍ سعتُه 2 μF موصولٍ بمصدرٍ تردُّدُه 100 Hz.

2. يتمُّ توصيلُ مصدرٍ متردِّدٍ جُهدُه اللحظيُّ $V = 10 \sin(100\ \pi\ t)$ بطرفَيْ مكثِّفٍ سعتُه 1 μF. احسبِ القيمةَ القصوى لشدَّةِ التيّارِ وفرقَ الطورِ بينَه وبينَ فرقِ الجُهدِ.

دائرةُ مقاومةٍ صرفةٍ وملفٌّ حثّيٌّ نقيٌّ ومكثّفٌ، موصولةٌ على التوالي



الشكل 6-25
دائرةُ تيّارٍ متناوبٍ لمقاومةٍ وملفٍّ حثّيٍّ ومكثّفٍ على التوالي حولَ طرفَيْ مصدرِ جُهدٍ متناوبٍ.

في **الشكل 6-25** يتمُّ توصيلُ مقاومةٍ صرفةٍ وملفٌّ نقيٌّ ومكثّفٌ على التوالي بطرفَيْ مصدرٍ تردُّدُه 0.1 Hz. نمثّلُ الاتّجاهَ الطوريَّ لكلٍّ من شدَّةِ التيّارِ وفرقِ الجُهدِ لكلٍّ من المقاومةِ والملفِّ والمكثّفِ كما يلي:

1. **المقاومةُ الأوميَّةُ:** فرقُ الجُهدِ وشدَّةُ التيّارِ في اتّجاهٍ واحدٍ وفرقُ الطورِ بينَهما يساوي صفرًا. ومعادلةُ كلٍّ منهما:

$$I_R = I_m \sin(\omega t) \quad ، \quad V_R = V_m \sin(\omega t)$$

2. **الملفُّ الحثّيُّ النقيُّ:** فرقُ الجُهدِ يسبقُ شدَّةَ التيّارِ بزاويةِ $\frac{\pi}{2}$. ومعادلةُ كلٍّ منهما:

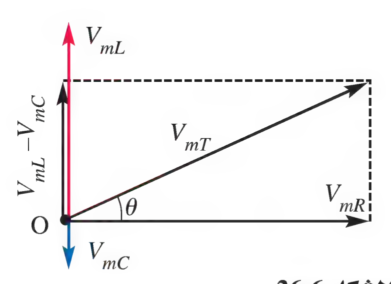
$$V_L = V_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

$$I_L = I_m \sin(\omega t)$$

3. **المكثّفُ:** فرقُ الجُهدِ يتأخّرُ عن التيّارِ بزاويةِ $\frac{\pi}{2}$. ومعادلةُ كلٍّ منهما:

$$V_C = V_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

$$I_L = I_m \sin(\omega t)$$



الشكل 6-26
المتّجهاتُ الطوريَّةُ لكلٍّ من V_R و V_L و V_C وكلّها تنطلقُ من نقطةِ الأصلِ O.

بتمثيل كلٍّ من $(V_R ، V_L ، V_C)$ باستعمالِ المتّجهاتِ الطوريَّةِ نحصلُ على **الشكل 6-26**. عندَ رسمِ هذه المتّجهاتِ بشكلٍ متوالٍ نحصلُ على **الشكل 6-27** حيث يمثّلُ V_{Tm} القيمةَ القصوى لفرقِ الجُهدِ الكلّيِّ. من **الشكل 6-27** يمكنُ الحصولُ على:

$$V_{mT} = \sqrt{V_{mR}^2 + (V_{mL} - V_{mC})^2} \quad \text{(أو بالقيمةِ الفعّالةِ)}$$

تُسمّى المقاومةُ الكلّيَّةُ للدائرةِ بالمعاوقةِ ونرمزُ لها بالرمزِ Z حيثُ:

$$V_{mT} = I_m Z$$

وبالتعويض عن قيم فروق الجهد:

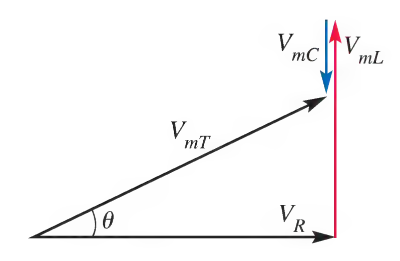
$$V_{mC} = I_m X_C ، \quad V_{mL} = I_m X_L ، \quad V_{mR} = I_m R$$

في معادلةِ V_{mT} نحصل على:

$$I_m Z = \sqrt{I_m^2 R^2 + I_m^2 (X_L - X_C)^2}$$

$$I_m Z = I_m \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$



الشكل 6-27
المتّجهاتُ الطوريَّةُ لكلٍّ من V_R و V_L و V_C على التوالي.

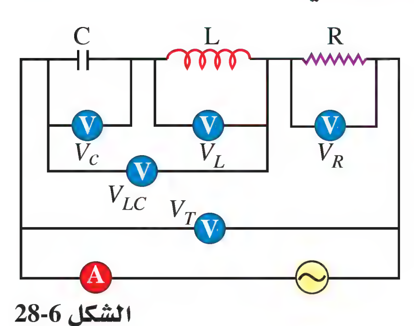
تمثّلُ Z مقدارَ المقاومةِ المكافئةِ للمقاومةِ الأوميَّةِ والممانعةِ الحثّيَّةِ والممانعةِ السعويَّةِ في الدائرةِ الكهربائيَّةِ. ومن **الشكل 6-27** يمكنُ الحصولُ على:

$$\tan\theta = \frac{V_{mL} - V_{mC}}{V_{mR}} = \frac{X_L - X_C}{R}$$

حيثُ تمثّلُ θ فرقَ الطورِ بينَ فرقِ الجُهدِ الكلّيِّ وبينَ شدَّةِ التيّارِ.

مثال 6 (ز)

دائرةُ مقاومةٍ صرفةٍ وملفٌ حثّيٌ نقيٌ ومكثّفٌ، موصولةٌ على التوالي



الشكل 6-28

المسألة

في الشكل 6-28، جدْ قراءاتِ الأمّيترِ والفولتميتراتِ المبيَّنة في الرسم، وزاوية فرقِ الطور بين V_R و V_T إذا كان: $V_{Te} = 30\ V$، $f = 50\ Hz$، $R = 12\ \Omega$، $X_C = 5\ \Omega$، $X_L = 14\ \Omega$.

الحلّ

1. أعرِّف

المعطى: $V_{Te} = 30\ V$ $\quad f = 50\ Hz \quad R = 12\ \Omega$

$X_C = 5\ \Omega \quad X_L = 14\ \Omega$

المجهول: $I_e = ?$ ، $V_{Re} = ?$ ، $V_{Le} = ?$ ، $V_{Ce} = ?$ ، $V_{LCe} = ?$ ، $\theta = ?$

2. أخطِّط

أختارُ معادلةً أو موقفًا: أستعملُ المعادلاتِ:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

$$I_e = \frac{V_e}{Z}$$

$$V_R = IR$$

$$V_L = X_L I$$

$$V_C = X_C I$$

$$V_{LC} = V_L - V_C$$

3. أحسب

أعوِّضُ في المعادلاتِ وأحسبُ القيمَ:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{12^2 + (14 - 5)^2} = 15\,\Omega$$

$$I_e = \frac{V_e}{Z} = \frac{30}{15} = \boxed{2\ A}$$

$$V_{Re} = RI_e = (12\,\Omega)\ (2\ A) = \boxed{24\ V}$$

$$V_{Le} = X_L I_e = (14\,\Omega)\ (2\ A) = \boxed{28\ V}$$

$$V_{Ce} = X_C I_e = (5\,\Omega)\ (2\ A) = \boxed{10\ V}$$

وبذلك يكونُ:

$$V_{LCe} = V_{Le} - V_{Ce} = 28\ V - 10\ V = \boxed{18\ V}$$

زاويةُ فرقِ الطورِ تحسبُ من العلاقة:

$$\tan\theta = \frac{V_{Le} - V_{Ce}}{V_{Re}} = \frac{18\ V}{24\ V} = \frac{3}{4} = 0.75$$

أو

$$\tan\theta = \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{14 - 5}{12} = \frac{9}{12} = \frac{3}{4} = 0.75$$

لذلك:

$$\boxed{\theta = 36.87^\circ}$$

تطبيق 6 (ز)

دائرةُ مقاومةٍ صرفةٍ وملفٌ حثّيٌّ نقيٌّ ومكثِّفٍ، موصولةٌ على التوالي

1. أوصلَ مصدرَ جُهدٍ متردِّدٍ قيمتُه اللحظيَّةُ $V = 20 \sin(100\,\pi\, t)$ بطرفَيْ مقاومةٍ صرفةٍ $100\ \Omega$ وملفٌ حثِّيٌّ نقيٌّ معاملُ حثِّهِ الذاتيِّ $0.2\ H$ على التوالي. احسبْ مقدارَ المعاوقةِ للدائرةِ الكلّيَّةِ والفرقَ في الطورِ بينَ شدَّةِ التيّارِ وفرقِ الجُهدِ الكلّيِّ.
2. إذا تمَّ توصيلُ المصدرِ في السؤال 1 حولَ طرفَيْ مكثِّفٍ سعتُه $2\ \mu F$ موصول على التوالي مع مقاومةٍ صرفةٍ $50\ \Omega$. احسبْ مقدارَ المعاوقةِ للدائرةِ والفرقَ في الطورِ بين شدَّةِ التيّارِ وفرقِ الجُهدِ الكلّيِّ.
3. يتمُّ توصيلُ المصدرِ في السؤالِ 1 مع مقاومةٍ $20\ \Omega$ ومكثِّفٍ سعتُه $4\ \mu F$ وملفٌّ مهمل المقاومة معاملُ حثِّهِ الذاتيِّ $2 \times 10^{-3}\ H$ موصولةٍ على التوالي. احسبْ زاويةَ الطورِ بين تيّارِ الدائرةِ وفرقِ الجُهدِ الكلّيِّ.

دائرة مقاومة صرفة وملف حَثّي نقي ومكثف، موصولة على التوازي

في **الشكلِ 6-29** يتمُّ توصيل مقاومة صرفة وملفّ نقيّ ومكثِّف على التوازي حول مصدر تيّار متناوب. في هذه الحالة ينقسم التيّارُ الأساسي إلى ثلاثة تيارات: i_R و i_L و i_C، حيث عندَ كلّ لحظة زمنية:

$$i = i_R + i_L + i_C \quad \text{(بشرط أن تجمع اتّجاهيًّا)}$$

في هذه الحالة يكون فرق الجهد هو نفسه حول طرفَي كلّ من R و L و C، لذلك نعتبر فرق الجهد هو المحور المرجع كما في **الشكلِ 6-30**.

بما أن التوصيل على التوازي، لذلك:

$$V = V_R = V_L = V_C$$

بتطبيق قانون أوم على كلّ فرع من فروع الدائرة:

$$I_R = \frac{V}{R} \;،\; I_L = \frac{V}{\omega L} \;،\; I_C = V\omega_C$$

I_L يتخلّف عن فرق الجهد المطبّق بزاوية فرق الطور 90°.

I_C يتقدّم على فرق الجهد المطبّق بزاوية فرق الطور 90°.

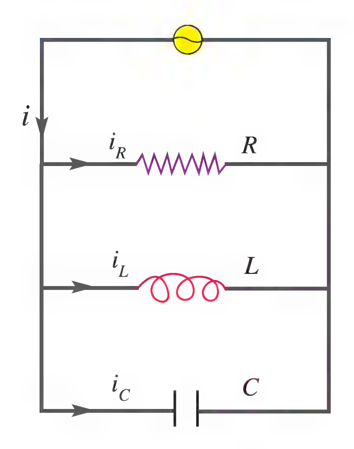
لذلك تكون زاوية فرق الطور بين I_L و I_C تساوي 180°، في حين أن التيّار المارّ خلال R يكون بنفس طور الفولتية الموضوعة. بتمثيل هذه الكمّيات بالمتّجهات الدوّارة نحصلُ على **الشكلِ 6-30**.

$$I = \sqrt{I_R^2 + (I_C - I_L)^2}$$

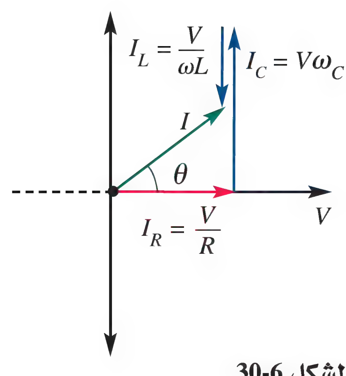
$$= V\sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2}$$

$$Z = \frac{V}{I}$$

$$\therefore\ Z = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2}}$$



الشكل 6-29
دائرة مقاومة وملف ومكثف على التوازي.



الشكل 6-30

وعليه:

$$I = \frac{V}{Z} = V\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2}$$

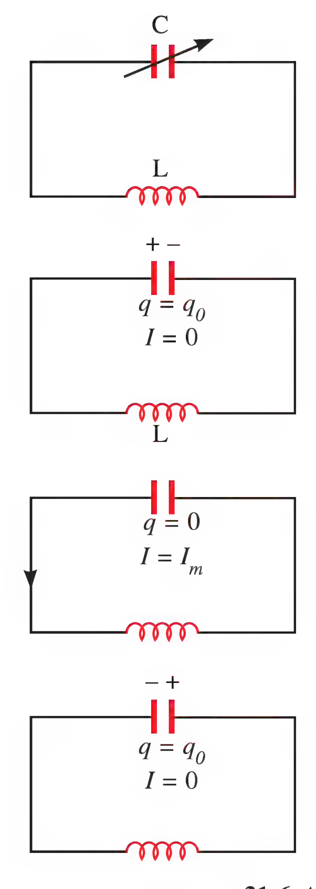
لذلك تكون للقيمة الفعالة للتيار الكلي I قيمة دنيا

عندما تكون $\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2}$ عند أقل قيمة لها،

أي عندما تكون $\omega C = \frac{1}{\omega L}$ ، أي $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.

في هذه الحالة تكون الدائرة في حالة رنين، وتكون $I = \frac{V}{R}$ أقل ما يمكن.

دائرةُ الاهتزازِ الكهربائيَّةُ



الشكل 6-31

دائرةُ الاهتزازِ الكهربائيَّةُ المؤلَّفةُ من محثٍّ ومكثِّفٍ متغيِّرِ السعةِ.

تتكوَّنُ دائرةُ الاهتزازِ الكهربائيَّةُ من محثٍّ ومكثِّفٍ متغيِّرِ السعةِ كما في **الشكل 6-31**. إن شحنَ المكثِّفِ في هذه الدائرةِ من أيِّ مصدرٍ خارجيٍّ سيحدثُ اهتزازًا كهربائيًّا لهذهِ الدائرةِ بتردُّدٍ يعتمدُ على قيمتَي L و C.

إذا كانَتِ الشحنةُ على المكثِّفِ تساوي q_0، فإن الطاقةَ الكهربائيَّةَ تختزنُ فيه على شكلِ مجالٍ كهربائيٍّ، يقومُ المكثِّفُ بتفريغِ الشحنةِ خلالَ الملفِّ الحثِّيّ، فيزدادُ التيّارُ ببطءٍ حتى يبلغَ قيمتَه العظمى عندَما يفقدُ المكثِّفُ كلَّ شحنتِه، وتختزنُ الطاقةُ الكهربائيَّةُ في الملفِّ الحثِّيِّ على شكلِ مجالٍ مغناطيسيٍّ، ثم تعودُ الشحناتُ الى المكثِّفِ حتى يصبحَ التيّارُ في الملفِّ صفرًا، وتختزنُ الطاقةُ الكهربائيَّةُ في المكثِّفِ على شكلِ مجالٍ كهربائيٍّ مرَّةً ثانيةً. ثم يعودُ المكثِّفُ بتفريغِها في الملفِّ، وهكذا تتكرَّرُ العمليّاتُ مرّاتٍ ومرّاتٍ، حيثُ يتمُّ تبادلُ الطاقةِ بينَ المكثِّفِ والملفِّ، ما لم يكنْ هناك فقدٌ للطاقةِ بسببِ مقاومةِ مادَّةِ المحثِّ، حيثُ يتبدَّدُ جزءٌ من الطاقةِ على شكلِ حرارةٍ في الملفِّ، مما يؤدّي إلى تخامدِ الاهتزازاتِ. إذا أُدخلَ إلى الدائرةِ تيّارٌ متناوب يتَّفقُ في التردُّدِ والطورِ مع تردُّدِ الدائرةِ نقول إنه حدثَ رنينٌ في الدائرةِ.

يمكنُ إحداثُ رنينٍ في الدائرةِ إذا أُدخلَ إليها تيّارٌ مهتزٌّ بتردُّدٍ معيَّنٍ، وذلك بتغييرِ سعةِ المكثِّفِ حتى يتمَّ التوليفُ والمساواةُ بينَ تردُّدِ الدائرةِ وتردُّدِ التيّارِ الداخلِ.

وهكذا يتمُّ التوليفُ بين تردُّدِ محطّاتِ الإذاعةِ والتلفازِ وتردُّدِ أجهزةِ الاستقبالِ في المنازلِ. فإذا حدثَ الرنينُ تمَّ الاستقبالُ من المحطَّةِ المرسلةِ.

يهتزُّ التيّارُ في الدائرةِ دونَ ممانعةٍ تُذكرُ إذا كانَت $X_L = X_C$:

حيث: $X_L = 2\pi f L$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

عندَها يكونُ: $2\pi f L = \frac{1}{2\pi f C}$

أو: $f^2 = \frac{1}{(2\pi)^2 LC}$

أي إن كلاً من تردُّدِ الدائرةِ وتردُّدِ محطَّةِ الإرسالِ يساوي f حيث:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

فمثلاً إذا كانَتْ $C = 0.25\ \mu F$ و $L = 5\ mH$ يكونُ تردُّدُ الرنينِ:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{(0.25 \times 10^{-6}\ F)(5 \times 10^{-3}\ H)}} = 4504\ Hz$$

المحوّلات

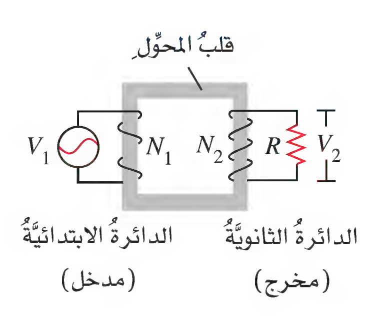
في بعضِ الأحيانِ، يكونُ مطلوبًا أو ضروريًّا تغييرُ ε متناوبةٍ إلى قيمةٍ أكبرَ، أو خفضُ قيمةٍ كبيرةٍ إلى قيمةٍ أقلَّ. الذي يجعلُ ذلك ممكنًا هو **المحوّلُ** transformer.

يتكوَّنُ أبسطُ أنواعِ المحوِّلاتِ من ملفَّيْن سلكيَّيْن مربوطَيْن حولَ قلبِ المحوِّلِ (شرائحَ من الحديدِ المطاوعِ)، كما في جهازِ تجربةِ فاراداي. الملفُّ الأيسرُ في **الشكل 6-32** يتألَّفُ من عدد N_1 من اللفَّاتِ، ويتَّصلُ بمدخلِ فرقِ جُهدٍ متناوبٍ. يُسمّى هذا الملفُّ بالملفِّ الابتدائيِّ. أما الملفُّ الأيمنُ فيتَّصلُ بمقاومٍ R، ويتألَّفُ من عدد N_2 من اللفَّات، ويُسمّى الملفَّ الثانويَّ. وكما في تجربةِ فاراداي، تُسيِّرُ قطعةُ الحديدِ المطاوعِ خطوطَ المجالِ المغناطيسيِّ، بحيثُ تمرُّ معظمُ الخطوطِ في كلا الملفَّيْن.

المحوِّل

جهازٌ يرفعُ القوَّةَ الدافعةَ الكهربائيَّةَ لتيّارٍ متناوبٍ، أو يخفضُها.

بما أنَّ شدَّةَ المجالِ المغناطيسيِّ هي نفسُها في قلبِ المحوِّلِ الحديديِّ ومقطعِه في الملفَّيْن الابتدائيِّ والثانويِّ، فإن فرقَ الجُهدِ المتناوبَ يختلفُ بينَ الملفَّيْن بالنظرِ إلى اختلافِ عددِ اللفّاتِ بينَهما. القوَّةُ الدافعةُ الكهربائيَّةُ المطبَّقةُ، التي تؤدّي إلى مجالٍ مغناطيسيٍّ متغيِّرٍ في الملفِّ الابتدائيِّ، تتعلَّقُ بالمجالِ المتغيِّرِ وفقَ قانونِ الحثِّ لفاراداي.



الشكل 6-32
يستعمل المحوِّلُ التيّارَ المتناوبَ في الدائرةِ الابتدائيَّةِ لحث تيّارٍ متناوبٍ آخرَ في الدائرةِ الثانويَّةِ.

$$V_1 = -N_1 \frac{\Delta\Phi_{\text{المغناطيسي}}}{\Delta t}$$

كما أنَّ القوَّةَ الدافعةَ الكهربائيَّةَ المحتثَّةَ في الملفِّ الثانويِّ، هي:

$$V_2 = -N_2 \frac{\Delta\Phi_{\text{المغناطيسي}}}{\Delta t}$$

يؤدّي حسابُ نسبةِ V_1 إلى V_2 إلى اختصارِ التعابيرِ في الجهةِ اليمنى، ما عدا N_1 و N_2. تعبِّرُ هذه النتيجةُ عن معادلةِ المحوِّلِ.

معادلةُ المحوِّلِ

$$V_2 = \frac{N_2}{N_1} V_1$$

ε المحتثَّةُ في الملفِّ الثانويِّ = (ε المطبَّقةَ في الملفِّ الابتدائيِّ) × (عددِ لفّاتِ الملفِّ الثانوي / عددِ لفّاتِ الملفِّ الابتدائي)

يمكنُ إعادةُ صياغةِ هذه المعادلةِ كمساواةٍ لنسبةِ فرقَيِ الجُهدِ مع نسبةِ عددِ اللفّاتِ.

$$\frac{V_2}{V_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

تسمّى النسبة $\frac{N_2}{N_1}$ نسبة تغيير المحوّل.

عندما تكونُ N_2 أكبرَ من N_1، تكونُ ε في الملفِّ الثانويِّ أكبرَ ممّا هي في الملفِّ الابتدائيِّ، ويُسمّى المحوِّلُ بالمحوِّلِ الرافع. لكن إذا كانَتْ N_2 أقلَّ من N_1، فتكونُ ε في الملفِّ الثانويِّ أقلَّ ممّا هي في الملفِّ الابتدائيِّ، ويُسمّى المحوِّلُ بالمحوِّلِ الخافض.

قد يتهيَّأُ لنا أن المحوِّلَ يُنتجُ شيئًا من لا شيء. فمثلاً يستطيعُ المحوِّلُ الرافعُ تحويلَ ε مطبَّقةٍ من 10 V إلى 100 V، في وقتٍ يجبُ أن تكونَ فيه القدرةُ في الدائرةِ الثانويَّةِ (المخرج) مساويةً (على الأكثر) للقدرةِ في الدائرةِ الابتدائيَّةِ (المدخل). لكن في الواقع تضيعُ بعضُ الطاقةِ على شكلِ حرارةٍ أو إشعاعاتٍ، فتكونُ القدرةُ عندَ المخرجِ أقلَّ مما هي عندَ المدخل. يقودُنا ذلك إلى أن أيَّ ازديادٍ في ε في الدائرةِ الثانويَّةِ يعني بالضرورةِ انخفاضًا متناسبًا في التيّارِ الكهربائيِّ.

مثال 6 (ح)

المحوّلات

المسألة

يُستعملُ محوِّلٌ رافعٌ على خطٍّ فرقِ جُهدٍ 120 V، ليرفعَه إلى 2400 V. إذا كانَ عددُ اللفّاتِ الابتدائيَّةِ 75 فما عددُ اللفّاتِ الثانويَّةِ؟

الحلّ

1. أعرِّف

المعطى: $V_1 = 120\ \text{V}$ $V_2 = 2400\ \text{V}$ $N_1 = 75$ لفَّة

المجهول: $N_2 = ?$

الرسم:

$N_1 = 75$ لفَّة $N_2 = ?$

$V_1 = 120\ \text{V}$ $V_2 = 2400\ \text{V}$

2. أخطِّط

أختارُ معادلةً أو موقفًا: أستعملُ معادلةَ المحوِّل:

$$V_2 = \frac{N_2}{N_1} V_1$$

أُعيدُ ترتيبَ المعادلةِ لأعزلَ المجهولَ:

$$N_2 = \frac{V_2}{V_1} N_1$$

3. أحسب

أعوِّضُ القيمَ في المعادلةِ وأحلُّ:

$$N_2 = \left(\frac{2400\ \text{V}}{120\ \text{V}}\right)(75\ \text{لفَّة}) = 1500\ \text{لفَّة}$$

$$\boxed{N_2 = 1500\ \text{لفَّة}}$$

4. أقيِّم

يؤدّي العددُ الأكبرُ من اللفّاتِ في الملفِّ الثانويِّ إلى قيمةٍ أكبرَ لـ ε في الدائرةِ الثانويَّةِ.

تطبيق 6 (ح)

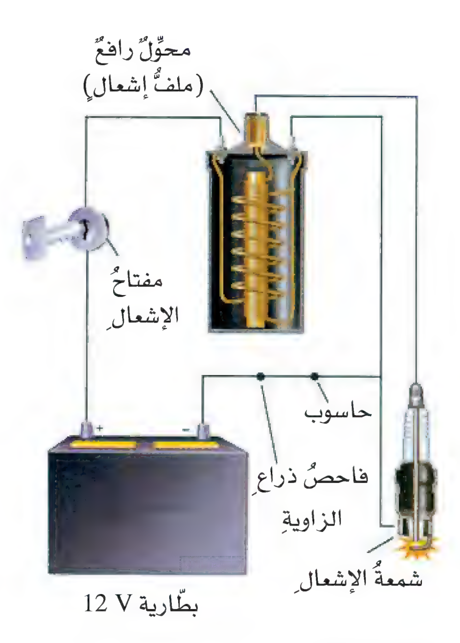
المحوّلات

1. يُستعملُ محوّلٌ رافعٌ في سيّارةٍ، ويكونُ فرقُ جُهدِهِ الابتدائيُّ 12 V، والثانويُّ 2.0×10^4 V. إذا كانَ عددُ اللفّاتِ الابتدائيَّةِ 21، فكم يكونُ عددُ اللفّاتِ الثانويَّةِ؟
2. نحتاجُ إلى فرقِ جُهدٍ 0.750 V لتوليدِ تيّارٍ عالٍ لجهازِ تلحيم. إذا كانَ فرقُ الجُهدِ الابتدائيُّ لمحوّلٍ خافضٍ 117 V، فكم تكونُ نسبةُ عددِ اللفّاتِ الابتدائيَّةِ إلى عددِ اللفّاتِ الثانويَّةِ؟

انعدامُ الكفاءةِ المثاليَّةِ في المحوّلاتِ الحقيقيَّةِ

تفترضُ معادلةُ المحوّلِ عدمَ ضياعِ أيِّ قدرةٍ بينَ لفّتَي المحوّلِ الابتدائيَّةِ والثانويَّةِ. للمُحوّلاتِ الحقيقيَّةِ كفاءةٌ تتراوحُ بين 90% و 99%. هناكَ فقدٌ في الطاقةِ ناتجٌ عن التيّاراتِ الصغيرةِ المحتثَّةِ بوساطةِ المجالاتِ المغناطيسيَّةِ المتغيِّرةِ في قلبِ المحوّلِ الحديديِّ، وبسببِ مقاومةِ أسلاكِ الملفّاتِ.

القدرةُ المفقودةُ نتيجةً للحرارةِ في أسلاكِ التوصيلِ تتغيَّرُ وفقَ المعادلةِ I^2R. ومن أجلِ تقليلِ I^2R إلى حدِّها الأدنى، والحصولِ على أقصى طاقةٍ منقولةٍ، تستعملُ شركاتُ الطاقةِ ε مرتفعةً وتيّاراتٍ منخفضةً عندَ نقلِ الطاقةِ إلى مسافاتٍ بعيدةٍ. إذا تمَّ خفضُ التيّارِ بعاملِ 10، تنخفضُ القدرةُ المهدورةُ بعاملِ 100. في الحقيقةِ، يتمُّ رفعُ ε في محطَّةِ الإنتاجِ إلى حوالي 230 000 V، ثم تُخفضُ إلى حوالي 20 000 V في محطاتِ التوزيعِ المحليَّةِ. وأخيرًا تُخفضُ إلى 220 V في منطقةِ استعمالِ المستهلكِ. إن ε المرتفعةَ في أسلاكِ التوصيلِ إلى المسافاتِ البعيدةِ تجعلُ الأسلاكَ خطرةً في حالةِ هبوبِ الرياحِ، التي قد تطرحُها أرضًا.



الشكل 6-33
يرفعُ المحوّلُ في محرِّكِ السيّارةِ فرقَ الجُهدِ بين طرفَيْ شمعةِ الإشعالِ فيتولَّدُ الشررُ.

ملفُّ الإشعالِ في محرِّكِ البنزين هو محوِّلٌ

تزوِّدُ بطّاريّةُ السيّارةِ أجهزَتها بقوَّةٍ دافعةٍ كهربائيَّةٍ ثابتةٍ، قيمتُها 12 V، من أجلِ تشغيلِ أنظمةِ السيّارةِ كافَّةً. يستعملُ نظامُ الإشعالِ (التشغيل) محوّلاً، يُسمّى ملفَّ الإشعالِ، من أجلِ رفعِ 12 V الناتجةِ عن البطّاريةِ إلى فرقِ جُهدٍ مرتفعٍ يؤدّي إلى شررٍ بين طرفَيْ شمعاتِ الإشعالِ. يُظهرُ **الشكلُ 6-33** نموذجًا لنوعٍ من أنظمةِ الإشعالِ يتمُّ استعمالُه في السيّاراتِ منذُ حوالي العامِ 1990. في هذا النظامِ، المُسمّى الإشعالَ الإلكترونيَّ، يكونُ لكلِّ أسطوانةٍ ملفُّ الإشعالِ الخاصُّ بها.

يجبُ أن يعملَ نظامُ الإشعالِ في سيّارتِك بالتوافقِ التامِّ مع باقي أجزاءِ المحرِّك. الهدفُ هو إشعالُ الوقودِ في اللحظةِ المناسبةِ التي يمكنُ فيها للغازِ المتمدِّدِ أن يبذلَ أقصى شغلٍ ممكنٍ. يقومُ فاحصٌ كهروضوئيٌّ يُسمّى فاحصَ ذراعِ الزاويةِ، باستعمالِ موقعِ ذراعِ القضيبِ، لتحديدِ اللحظةِ التي تكونُ فيها محتوياتُ الأسطوانةِ عند أقصى انضغاطٍ ممكنٍ.

عندَ ذلك يقومُ الفاحصُ بإرسالِ إشارةٍ إلى حاسوبِ السيّارةِ. لدى تسلُّمِ الإشارةِ يقومُ الحاسوبُ بإغلاقِ الدائرةِ الابتدائيَّةِ الموصولةِ بملفٍّ الأسطوانةِ، ما يؤدّي إلى رفعِ التيّارِ الابتدائيِّ بسرعةٍ. عرفنا من قبلُ أن الارتفاعَ في التيّارِ يؤدّي إلى تغيُّرٍ سريعٍ في المجالِ المغناطيسيِّ للمحوِّلِ. وبما أن التغيُّرَ في المجالِ المغناطيسيِّ للدائرةِ الابتدائيَّةِ سريعٌ جدًّا، فإنه يؤدّي إلى ε محتثَّةٍ وعاليةٍ جدًّا، تتراوحُ بين 40 000 V و 100 000 V. تُطبَّقُ القوّةُ الدافعةُ الكهربائيةُ هذه حول طرفَيْ شمعةِ الإشعالِ، وتولِّدُ شررًا يحرقُ الوقودَ الذي يغذّي سيّارتَك.

نقلُ الطاقةِ

تُعتبرُ الطاقةُ الكهربائيَّةُ من أكثرِ أنواعِ الطاقةِ شيوعًا واستعمالاً في المنازلِ والمصانعِ، حيث تستعملُ في الإضاءةِ والتدفئةِ وفي تشغيلِ الآلاتِ المنزليَّةِ، وكذلك تشغيلِ الآلاتِ الصناعيَّةِ.

ويتمُّ نقلُ الطاقةِ من محطّاتِ التوليدِ إلى المنازلِ والمصانعِ خلالَ شبكاتٍ من الأسلاكِ تُسمّى شبكاتِ نقلِ الطاقةِ الكهربائيَّةِ، حيث يسري التيّارُ الكهربائيُّ من محطّاتِ التوليدِ إلى مواقعِ الاستهلاكِ عبرَ هذه الأسلاكِ. وبالنظرِ إلى أن أسلاكَ نقلِ الكهرباءِ تمتدُّ إلى مسافاتٍ كبيرةٍ (مئاتِ الكيلومتراتِ عادةً)، فإنها تمثِّلُ مقاومةً غيرَ قليلةٍ للتيّارِ الكهربائيِّ، وهذا يؤدّي إلى فقدِ جزءٍ من الطاقةِ في الأسلاكِ يعتمدُ على مقاومةِ هذه الأسلاكِ وعلى شدَّةِ التيّارِ المارِّ بها. يمكنُ حسابُ الطاقةِ الضائعةِ من العلاقةِ:

$$E_{\text{الضائعة}} = I^2 \times Rt$$

وحسابُ القدرةِ P الضائعةِ من العلاقةِ $P = I^2R$.

حيث تمثِّلُ I شدَّةَ التيّارِ و R مقاومةَ الأسلاكِ و t الزمنَ.

نلاحظُ أن الطاقةَ المفقودةَ تتناسبُ طرديًّا مع مقاومةِ الأسلاكِ ومع مربَّعِ شدَّةِ التيّارِ، مما يعني أن شدَّةَ التيّارِ تؤثِّرُ تأثيرًا كبيرًا في فقدِ الطاقةِ أكثرَ من تأثيرِ المقاومةِ.

وبهذا فإنه يركِّزُ على تقليلِ شدَّةِ التيّارِ في الأسلاكِ التي تنقلُ الطاقةَ الكهربائيَّةَ باستعمالِ المحوِّلاتِ الكهربائيَّةِ الرافعةِ للجُهدِ.

إذا كانَ تيّارُ الملفِّ الابتدائيِّ I_1 كبيرًا، وفرقُ الجُهدِ صغيرًا، فإن ذلك يولِّدُ في الملفِّ الثانويِّ الذي عددُ لفّاتِه (N_2) أكثرُ، تيّارًا صغيرًا وفرقَ جُهدٍ كبيرًا. وعندَ وصولِه للاستهلاكِ يخفَّضُ الجُهدُ مرَّةً أخرى قبلَ الاستعمالِ بوساطةِ محوِّلٍ خافضٍ للجُهدِ.

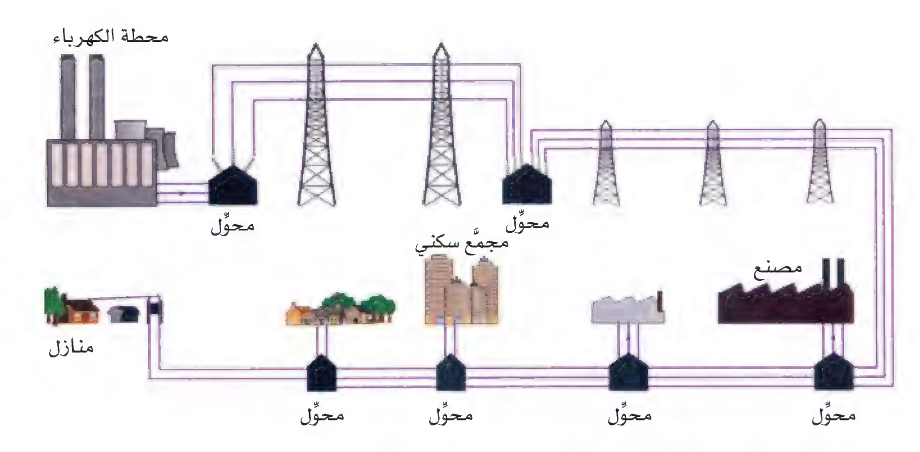
يمكنُ أيضًا تقليلُ الطاقةِ الضائعةِ بزيادةِ سمكِ أسلاكِ التوصيلِ، واستعمالِ أسلاكٍ من موادَّ ذاتِ مقاومةٍ نوعيَّةٍ صغيرةٍ نسبيًّا.

كفاءةُ النقلِ هي النسبةُ المئوية بينَ القدرةِ الواصلةِ للمدينةِ أو المصنع، والقدرةِ المرسَلةِ من محطّةِ التوليدِ، كما في **الشكل 6-34**.

أي إن: كفاءةَ النقلِ = $\frac{\text{القدرةَ الواصلةَ لدائرةِ الاستهلاكِ}}{\text{القدرةِ المرسلةِ من محطّةِ التوليدِ}} \times 100\%$

$= \frac{\text{القدرةَ المرسلةَ − القدرةِ الضائعةِ في أسلاكِ النقلِ}}{\text{القدرةِ المرسلةِ}} \times 100\%$

الكفاءة $= \frac{P_{\text{مرسلة}} - P_{\text{ضائعة}}}{P_{\text{مرسلة}}} \times 100\% = \frac{P_{\text{واصلة}}}{P_{\text{مرسلة}}} \times 100\%$



الشكل 6-34
تنتقل الطاقة الكهربائية من محطات التوليد إلى أماكن استهلاكها بوساطة شبكات الأسلاك والمحوّلات.

مثال 6 (ط)

نقلُ الطاقةِ

المسألة

محطّةٌ لتوليدِ الطاقةِ الكهربائيّةِ، قدرةُ الملفِّ الثانويِّ الكهربائيَّةُ في محوِّلها تساوي 1 MW. تُرسِلُ هذه المحطّةُ تيّارَها الكهربائيَّ إلى المدينةِ عبرَ خطوطٍ ناقلةٍ مقاومتُها $10\,\Omega$ تحتَ فرقِ جهدٍ 1×10^5 V. احسبْ كفاءةَ النقلِ.

الحـلّ

1. أعرِّف

المعطى: $P_{\text{مرسلة}} = 1$ MW ، $R = 10\Omega$ ، $\Delta V = 1 \times 10^5$ V

المجهول: الكفاءة = ؟

2. أخطِّط

أختارُ معادلةً أو موقفًا: أستعملُ العلاقتَيْن:

$$P_{\text{مرسلة}} = I\Delta V$$

$$\text{الكفاءة} = \frac{P_{\text{واصلة}}}{P_{\text{مرسلة}}}$$

3. أحسب

أعوِّضُ في المعادلاتِ وأحلُّ:

$$P_{\text{مرسلة}} = I\Delta V$$

$$I = \frac{P_{\text{مرسلة}}}{\Delta V} = \frac{1 \times 10^6\ \text{W}}{1 \times 10^5\ \text{V}}$$

$$I = 10\ \text{A}$$

$$P = I^2 \times R = (10\ \text{A})^2 \times (10\,\Omega) = 10^3\ \text{W}$$

$$P_{\text{واصلة}} = P_{\text{مرسلة}} - P_{\text{ضائعة}}$$

$$P_{\text{واصلة}} = 10^6\ \text{W} - 10^3\ \text{W} = 999 \times 10^3\ \text{W}$$

$$\text{الكفاءة} = \frac{P_{\text{واصلة}}}{P_{\text{مرسلة}}} = \frac{999 \times 10^3\text{W}}{10^6\ \text{W}} = \frac{999}{10^3} = \boxed{0.999 = 99.9\ \%}$$

تطبيق 6 (ط)

نقلُ الطاقةِ

1. احسبِ القدرةَ الضائعةَ على شكلِ حرارةٍ في سلكٍ مقاومتُه 120 Ω يمرُّ فيه تيّارٌ 50 A.
2. إذا أُرسلَتْ طاقةٌ قدرتُها 3 MW عبرَ السلكِ في السؤالِ 1. احسبِ القدرةَ الواصلةَ إلى آخرِ السلكِ، واستنتجْ كفاءةَ نقلِ الطاقةِ.

مراجعةُ القسم 6-3

1. تبلغُ القيمةُ الفعّالةُ لتيّارٍ في ملفٍّ منفردٍ لكيتارٍ كهربائيٍّ 0.025 A، في حين أن مقاومةَ الملفِّ 4.3 kΩ. ما أقصى قيمةٍ للتيّارِ اللحظيِّ؟ ما القيمةُ الفعّالةُ لـ ε الناتجةِ في الملفِّ والقيمةُ العظمى لفرقِ الجهدِ؟
2. لماذا تتمُّ عمليَّةُ شحنِ المكثِّفِ فقطْ عندَ تطبيقِ الجُهدِ المستمرِّ عليه؟
3. **تفكيرٌ ناقدٌ:** ما القيمةُ المتوسِّطةُ لتيّارٍ متناوبٍ على مدى دورةٍ كاملةٍ؟ لماذا يسخنُ المقاومُ إذًا عندَ مرورِ التيّارِ المتناوبِ فيه؟

ملخَّصُ الفصل 6

أفكارٌ أساسيَّة

القسم 6-1 الكهربائيَّةُ الناتجةُ عن المغناطيسيَّة

- إن تغيُّرَ التدفُّقِ المغناطيسيِّ خلالَ ملفٍّ موصِّلٍ يحثُّ تيّارًا كهربائيًّا في الملفِّ. يُسمّى هذا المفهومُ الحثَّ الكهرومغناطيسيَّ.
- ينصُّ قانونُ لنز على أن المجالَ المغناطيسيَّ الناتجَ عن التيّارِ يعاكسُ التغيُّرَ الذي أوجدَه.
- يمكنُ حسابُ مقدارِ ε المحتثَّةِ بتطبيقِ قانونِ فارادايِ للحثِّ.

القسم 6-2 المولِّداتُ والمحرِّكاتُ والحثُّ المتبادلُ

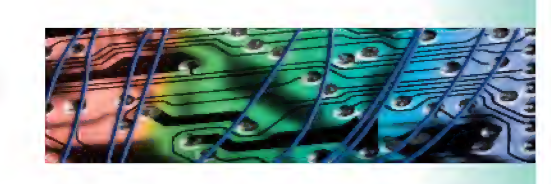
- تُوظِّفُ المولِّداتُ ظاهرةَ الحثِّ لتحويلِ الطاقةِ الميكانيكيَّةِ إلى طاقةٍ كهربائيَّةٍ.
- يُستعملُ في المحرِّكاتِ ترتيبٌ مشابهٌ للمولِّداتِ، لتحويلِ الطاقةِ الكهربائيَّةِ إلى طاقةٍ ميكانيكيَّةٍ.
- الحثُّ المتبادلُ هو العمليَّةُ التي يتمُّ فيها حثُّ ε في إحدى الدوائرِ نتيجةً لتغيُّرِ التيّارِ الكهربائيِّ في دائرةٍ أُخرى مجاورةٍ.

القسم 6-3 دوائرُ التيّارِ المتناوبِ والمحوِّلاتُ

- إن القيمةَ الفعّالةَ للتيّارِ وللقوَّةِ الدافعةِ الكهربائيَّةِ، في دائرةِ تيّارٍ متناوبٍ، هما مقياسانِ مهمّانِ لخصائصِ دائرةِ التيّارِ المتناوبِ.
- إن فرقَ الجُهدِ حولَ طرفَيْ مقاومةٍ صرفةٍ في دائرةِ تيّارٍ متناوبٍ يكونُ متَّفقًا في الطورِ المارِّ في المقاومةِ.
- هناك فرقٌ في الطورِ بينَ فرقِ الجُهدِ حولَ طرفَيْ مكثِّفٍ أو محثٍّ نقيٍّ وبينَ التيّارِ المارِّ في كلٍّ منهما.
- تردُّد (الرنين) اهتزازِ دائرةِ $(L - C)$ بدونِ مقاومةٍ هو $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$.
- تُغيِّرُ المحوِّلاتُ القوَّةَ الدافعةَ الكهربائيَّةَ لتيّارٍ متناوبٍ في دائرةٍ.

مصطلحاتٌ أساسيَّة

- الحثُّ الكهرومغناطيسيُّ Electromagnetic induction (ص 152)
- التيّار الحثي Induced current (ص 152)
- الحثُّ الذاتيّ Self induction (ص 157)
- معاملُ الحثِّ الذاتيِّ Coefficient of self induction (ص 157)
- التيّاراتُ الدوامية Eddy currents (ص 162)
- المولِّد Generator (ص 163)
- التيّارُ المتناوب Alternating current (ص 165)
- القوَّةُ الدافعةُ الكهربائيَّةُ المحتثة المضادَّة Back emf (ص 166)
- الحثُّ المتبادلُ Mutual inductance (ص 168)
- القيمةُ الفعّالةُ للتيّار Effective current (rms) (ص 170)
- المقاومةُ الصرفةُ Pure resistor (ص 172)
- الممانعةُ الحثيَّةُ Inductive impedance (ص 174)
- الممانعةُ السعويَّةُ Capactive impedance (ص 175)
- المحوّل Transformer (ص 181)



مراجعةُ الفصل 6

راجعْ وقيِّمْ

الكهرباءُ الناتجةُ عن المغناطيسيَّةِ

أسئلةُ مراجعة

1. افترضْ أن لديكَ دائرتَيْن كهربائيتَيْن، تتألَّفُ الدائرةُ الأولى من مغناطيسٍ كهربائيٍّ ومصدرِ ε لتيّارٍ مستمرٍّ ومقاومةٍ متغيِّرةٍ تسمحُ بتغييرِ شدَّةِ المجالِ المغناطيسيِّ. تتألَّفُ الدائرةُ الثانيةُ من ملفٍّ سلكيٍّ موصولٍ بكلفانوميتر. اذكُرْ ثلاثَ طرائقَ تمكِّنُكَ من حثِّ تيّارٍ كهربائيٍّ في الدائرةِ الثانيةِ.

2. وضِّحْ كيفَ يسمحُ قانونُ لنز بتحديدِ اتِّجاهِ التيّارِ المُحتَثِّ.

3. ما العواملُ الأربعةُ التي تؤثِّرُ في مقدارِ ε المحتثَّةِ في ملفٍّ سلكيٍّ؟

4. إذا كانَ لديكَ مجالٌ مغناطيسيٌّ منتظمٌ وطولٌ محدَّدٌ من سلكٍ، فكيف تزيدُ ε المحتثَّةَ حولَ طرفَيِ السلكِ؟

أسئلةٌ حولَ المفاهيم

5. يؤدّي إدخالُ القطبِ الشماليِّ لمغناطيسٍ إدخالاً سريعًا في ملفٍّ سلكيٍّ موصولٍ بكلفانوميتر، إلى انحرافِ مؤشِّرِ الكلفانوميترِ نحوَ اليمينِ. كيفَ ينحرفُ المؤشِّرُ إذا قُمْتَ بما يلي؟

أ. سحبْتَ المغناطيسَ إلى خارجِ الملفِّ.

ب. تركْتَ المغناطيسَ مُستقرًّا داخلَ الملفِّ.

ج. دفعْتَ القطبَ الجنوبيَّ للمغناطيسِ إلى داخلِ الملفِّ.

6. بيِّنْ كيفَ يوضِّحُ قانونُ لنز مبدأَ حفظِ الطاقةِ.

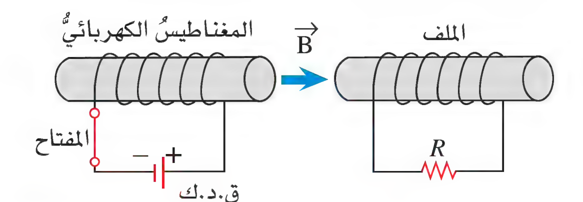
7. هل يؤدّي إسقاطُ مغناطيسٍ قويٍّ داخلَ أنبوبٍ نحاسيٍّ طويلٍ إلى حثِّ تيّارٍ كهربائيٍّ في الأنبوبِ؟ إذا أجبْتَ بنعم، فكيف يؤثِّرُ التيّارُ المُحتثُّ في حركةِ المغناطيسِ؟

8. وُضعَ قضيبانِ مغناطيسيّانِ جنبًا إلى جنبٍ بحيثُ يكونُ القطبُ الشماليُّ لأحدِهما قُربَ القطبِ الجنوبيِّ للآخرِ. إذا دُفعَ المغناطيسان نحو ملفٍّ سلكيٍّ، فهل تتوقَّعُ ε مُحتثَّةً في السلكِ؟ وضِّحْ إجابتَك.

9. وُضع مغناطيسٌ كهربائيٌّ قربَ ملفٍّ سلكيٍّ كما هو موضَّحٌ أدناه. بحسبِ قانونِ لنز، كيفَ يكونُ اتِّجاهُ التيّارِ المُحتَثِّ في المقاومِ R، في الحالتَيْن التاليتَيْن؟

أ. المجالُ المغناطيسيُّ ينخفضُ فجأةً بعدَ فتحِ المفتاحِ الكهربائي.

ب. قُرِّبَ الملفُّ أكثرَ نحوَ المغناطيسِ الكهربائي.



مسائلُ تطبيقيَّة

10. حلقةٌ دائريَّةٌ من سلكٍ موصِّلٍ، نصفُ قُطرِها 0.12 m وهي عموديَّةٌ على مجالٍ مغناطيسيٍّ شدَّتُه 0.15 T، كما في الشكل (أ) أدناه. سُحبَتِ الدائرةُ من طرفَيْها بحيثُ أُغلقَتْ على مساحةِ 3×10^{-3} m^2 كما في الشكل (ب) أدناه. إذا استغرقَ إغلاقُ الدائرةِ 0.2 s، جِدْ مقدارَ متوسِّطِ ε المحتثَّةِ في الدائرةِ، خلالَ هذا الزمنِ.



11. وُضعَ ملفٌّ مستطيلٌ طولُه 0.085 m وعرضُه 0.055 m، بحيث تكونُ مساحتُهُ عموديَّةً على اتِّجاهِ مجالٍ مغناطيسيٍّ $\vec{B}$. إذا كانَ للملفِّ 75 لفَّةً، ومقاومةٌ كليَّةٌ 8.7 Ω، وإذا انخفضَ مقدارُ المجالِ بمعدَّلِ 3.0 T/s، فما مقدارُ التيّارِ المُحتثِّ في الملفِّ؟

12. أُسقطَ ملفٌّ، فيه 52 لفّةً ومساحةُ مقطعِه $5.5 \times 10^{-3}\ m^2$، من موقعٍ شدَّةُ المجالِ المغناطيسيِّ فيه $B = 0.00\ T$ إلى موقعٍ آخرَ شدَّةُ المجالِ فيه $B = 0.55\ T$. إذا تمَّ الانتقالُ خلالَ 0.25 s وكانَتْ مساحةُ الملفِّ عموديَّةً على خطوطِ المجالِ المغناطيسيِّ، فكم يكونُ متوسِّطُ ε المحتثَّةِ في الملفِّ؟

المولِّداتُ والمحرِّكاتُ والحثُّ المتبادَلُ

أسئلةُ مراجعة

13. اذكرِ المكوّناتِ الرئيسةَ للمولِّدِ الكهربائيِّ، وبيِّنْ دورَ كلٍّ منها في توليدِ ε متناوبة.

14. يقومُ متعلِّمٌ بتدويرِ قبضةِ مولِّدٍ صغيرٍ موصولٍ بمقبسٍ في مصباحٍ 15 W. يضيءُ المصباحُ بتوهُّجٍ قليلٍ جدًّا. ماذا يفعلُ المتعلِّمُ لكي يزيدَ من توهُّجِ المصباحِ؟

15. ماذا تعني كلمةُ تردُّدٍ فيما يخصُّ التيّارَ المتناوبَ؟

16. كيفَ يُحوَّلُ مولِّدُ *AC* إلى مولِّدِ *DC*؟ وضِّحْ إجابتَك.

17. ما معنى القوّةِ الدافعةِ الكهربائيَّةِ المضادةِ؟ كيف تُحتثُّ هذه القوّةُ الدافعةُ في محرِّكٍ كهربائيٍّ؟

18. بيِّنْ كيفيَّةَ حدوث الحثِّ المتبادلِ.

19. ما الفرقُ بين المحوّلِ الرافعِ والمحوّلِ الخافضِ؟

20. هل يرفعُ المحوِّلُ الرافعُ القدرةَ؟ وضِّحْ إجابتَك.

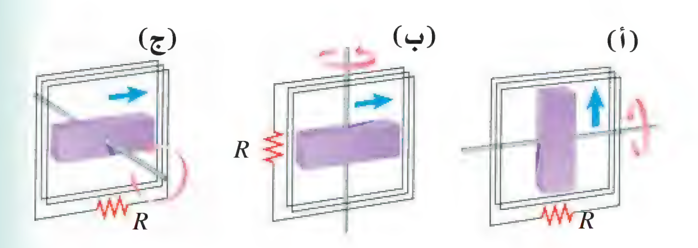
أسئلةٌ حولَ المفاهيم

21. عندَما يكونُ مستوى دائرةٍ دوّارةٍ موازيًا لخطوطِ المجالِ المغناطيسيِّ، يكونُ عددُ خطوطِ المجالِ التي تخترقُ الدائرةَ صفرًا. لماذا يكونُ للتيّارِ المُحتثِّ قيمةٌ قصوى خلالَ هذه اللحظةِ من دورانِ الدائرةِ؟

22. إذا زيدَ عددُ لفّاتِ ملفٍّ مثلَيْ ما كانَ عليه عن طريقِ لفِّ طبقةٍ أُخرى من اللفّاتِ فوقَ الأولى وباتِّجاهِ الملفِّ نفسِه، فماذا يحدثُ لمعاملِ التأثيرِ الذاتيِّ *L*؟

23. في الكثيرِ من المحوِّلاتِ، يكونُ السلكُ حولَ أحدِ الملفَّيْنِ أكثرَ سمكًا، وبالتالي تكونُ مقاومتُه أقلَّ، مقارنةً بالسلكِ الملفوفِ حولَ الملفِّ الآخرِ. إذا لُفَّ السلكُ الأكثرُ سمكًا حولَ الملفِّ الثانويِّ، فهل يكونُ المحوِّلُ رافعًا أم خافضًا؟ علِّلْ إجابتَك.

24. رُبطَ قضيبٌ مغناطيسيٌّ عموديًّا بساقٍ دوّارةٍ. ثم وضعَ المغناطيسُ عندَ مركزِ ملفٍّ سلكيٍّ. في أيٍّ من الحالاتِ الموضَّحةِ أدناه يمكنُ استعمالُ الجهازِ كمولِّدٍ كهربائيٍّ؟ وضِّحْ إجابتَك.



25. هل يعملُ المحوِّلُ في حالةِ تيّارٍ مستمرٍّ فيه نبضاتٌ؟ وضِّحْ إجابتَك.

26. كلَّما كانَ دورانُ ملفِّ مولِّدِ *AC* أسرعَ، صعُب تدويرُ هذا الملفِّ. استعملْ قانونَ لنز لتعليلِ ذلك.

مسائلُ تطبيقيَّة

27. القيمةُ الفعّالةُ للقوّةِ الدافعةِ الكهربائيَّةِ في خطِّ جُهدٍ عالٍ يبلغُ في إحدى الدولِ 220 000 V. ما أقصى قيمةٍ لـ ε؟

28. القيمةُ القصوى للتيّارِ الذي يمرُّ في مصباحٍ ضوئيٍّ هي 0.909 A، عندَما تكونُ مقاومتُه 182 Ω.

أ. ما القيمةُ الفعّالةُ للتيّارِ المارِّ في فتيلةِ المصباحِ؟

ب. ما القيمةُ الفعّالةُ للقوّةِ الدافعةِ الكهربائيَّةِ حولَ طرفَيِ الفتيلةِ؟

ج. ما القدرةُ التي يستعملها المصباحُ الضوئيُّ؟

دوائرُ التيّارِ المتناوب والمحوّلاتُ

أسئلةُ مراجعة

29. أيُّ الكمّياتِ تبقى ثابتةً عندَ توليدِ التيّارِ المتناوبِ؟

30. ما علاقةُ القدرةِ الضائعةِ في مقاومٍ نتيجةً لتيّارٍ متناوبٍ، بالقدرةِ الضائعةِ نتيجةً لتيّارٍ مستمرٍّ، علمًا أن شدَّةَ التيّارِ المستمرِّ وفرقَ جهدِهِ يُساويان القيمةَ القصوى لشدَّةِ التيّارِ المتناوبِ وفرقِ جهدِهِ؟

31. كيف تتأثَّرُ ممانعةُ المكثِّفِ في دوائرِ التيّارِ المتناوبِ مع تغيُّرِ التردُّدِ؟

32. أوضحْ لماذا يكونُ نقلُ الطاقةِ الكهربائيَّةِ، بفرقِ جُهدٍ عالٍ وتيّارٍ منخفضٍ، أكثرَ فاعليَّةً من نقلِها بفرقِ جُهدٍ منخفضٍ وتيّارٍ عالٍ.

أسئلةُ حولَ المفاهيمِ

33. في قاطعِ الخللِ الأرضيِّ (GFI) Ground Fault Interrupter، هل تقاسُ فروقُ التيّارِ في مقبسٍ بدلالةِ القيمةِ الفعّالةِ للتيّارِ أم بدلالةِ القيمةِ اللحظيَّةِ للتيّارِ في أي لحظةٍ؟ وضِّحْ إجابتَك.

34. الفولتميتراتُ والأمّيتراتُ التي تقيسُ الكمّياتِ المتناوبةَ تُعيَّرُ لقياسِ القيمةِ الفعّالةِ للقوَّةِ الدافعةِ والتيّارِ، على التوالي. لماذا يُفضَّلُ ذلك على قياسِ القيمِ القصوى لكلٍّ من ε والتيّارِ؟

مسائلُ تطبيقيَّة

35. يُستعملُ محوِّلٌ لتحويلِ 120 V إلى 9.0 V وذلك لتشغيلِ مشغِّلِ CD. إذا كانَ للدائرةِ الابتدائيَّةِ الموصولةِ بالمصدرِ 640 لفَّةً، فكم يبلغُ عددُ لفّاتِ الدائرةِ الثانويَّةِ؟

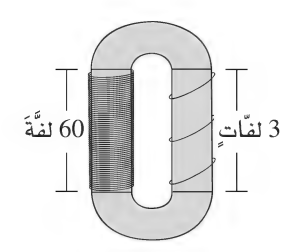
36. افترض أن لمشغِّلِ CD، فرقُ جُهدِه 9.00 V، محوِّلاً لتحويلِ التيّارِ وفرقِ الجُهدِ، في إحدى الدولِ. إذا كانَتْ نسبةُ عددِ اللفّاتِ الابتدائيَّةِ إلى عددِ اللفّاتِ الثانويَّةِ 24.6 إلى 1، فما فرقُ جُهدِ المصدرِ في تلك الدولةِ؟

37. يُستعملُ محوِّلٌ لتحويلِ 120 V إلى 6.3 V وذلك لتشغيلِ قطارِ-لُعبةٍ. إذا كانَ عددُ اللفّاتِ الابتدائيَّةِ 210، فما عددُ اللفّاتِ الثانويَّةِ؟

38. المحوِّلُ الموضَّحُ في الشكلِ المجاورِ مصنوعٌ من الملفِّ الأيسرِ الذي يحتوي على عددٍ من اللفّاتِ يفوقُ 20 ضعفًا عددَ اللفّاتِ في الملفِّ الأيمنِ.

أ. إذا كانَ فرقُ جُهدِ المدخلِ موصولاً بالملفِّ الأيسرِ، فما نوعُ المحوِّلِ في هذه الحالةِ؟

ب. إذا كانَ فرقُ جُهدِ المدخلِ 24 000 V، فما فرقُ جُهدِ المخرجِ؟



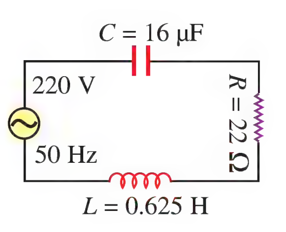
39. في الدائرةِ الكهربائيَّةِ في الشكلِ المجاورِ، احسبْ فرقَ الجُهدِ الكلّيَّ V_T بين طرفَي المصدرِ b ،a.

$V_C = 6$ V
$V_L = 10$ V
$V_R = 3$ V
a
b

40. في الدائرةِ الكهربائيَّةِ في الشكلِ المجاورِ، احسبِ المعاوقةَ للدائرةِ.

$X_L = 24\ \Omega$
$X_C = 16\ \Omega$
$R = 6\ \Omega$

41. إذا كانتِ الدائرةَ المبيَّنةُ في الشكلِ المجاورِ في حالةِ رنينٍ مع التيّارِ المغذّي لها، فما هي الشدَّةُ الفعّالةُ للتيّارِ المتناوبِ؟



42. دائرةُ رنينٍ تتكوَّنُ من ملفٍّ تأثيريٍّ ومكثِّفٍ متغيِّرِ السعةِ، فإذا كانَتْ سعةُ المكثِّفِ 400 μF، ثم أنقصتَ إلى μF 100، فكم يصبحُ تردُّدُ الدائرةِ؟

43. ملفٌّ تأثيريٌّ له مقاومةٌ أوميَّةٌ 10 Ω ومعاملُ حثِّهِ الذاتيِّ 0.5 H. وصِّلَ على التوالي مع مكثِّفٍ سعتُه 150 μF، ومصدرٍ للتيّارِ الكهربائيِّ فرقُ جُهدِه الفعّالُ 250 V، وتردُّدُه 50 Hz، احسب:

أ. الشدَّةَ الفعّالةَ للتيّارِ المتناوبِ.

ب. القيمةَ الفعّالةَ لفرقِ الجُهدِ بين طرفَيْ كلٍّ من الملفِّ والمكثِّفِ.

44. مصباحٌ قدرتُه 100 W تحتَ فرقِ جُهدٍ فعّالٍ 120 V. يُرادُ تشغيلُه بوساطةِ مصدرٍ كهربائيٍّ متناوبٍ، فرقُ جُهدِهِ الفعّالُ 240 V، وتردُّدُه 50 Hz، احسبْ سعةَ المكثِّفِ الذي لو وصِّلَ مع المصباحِ على التوالي لتمَّتْ إضاءَتُه بالقدرةِ نفسِها.

45. ملفٌّ معاملُ تأثيرِهِ الذاتيِّ $L = 50$ mH يمرُّ به تيّارٌ شدَّتُه 2 A، عندَما يكونُ بين طرفَيْه فرقُ جُهدٍ مستمرٌّ مقدارُه 20 V. احسبِ الشدَّةَ العظمى للتيّارِ الذي يمرُّ في الملفِّ، عندَما يكونُ بين طرفَيْه فرقُ جُهدٍ متناوبٌ قيمتُه الفعّالةُ 20 V وتردُّدُه 60 Hz.

مراجعةٌ عامَّة

46. يحاولُ متعلِّمٌ صنعَ مولِّدٍ بسيطٍ، بوضعِ حلقةٍ منفردةٍ بينَ قطبَيْ مغناطيسِ حدوةِ الحصانِ، شدَّةُ مجالِه 2.5×10^{-2} T. مساحةُ الحلقةِ $7.54 \times 10^{-3}\ m^2$، وهي تتحرَّكُ بشكلٍ عموديٍّ على خطوطِ المجالِ. خلالَ أيِّ فترةٍ زمنيَّةٍ يجبُ على المتعلِّمِ نقلُ الحلقةِ إلى خارجِ المجالِ، بحيثُ تحثُّ ε 1.5 V؟ هل هذا المولِّدُ عمليٌّ؟

47. أُزيلَ ملفٌّ فيه 325 لفَّةً، ومساحتُه $19.5 \times 10^{-4}\ m^2$، من منطقةِ مجالٍ مغناطيسيٍّ منتظمٍ، بزاويةِ 45°، وخلالَ فترة 1.25 s. إذا كانَتْ ε المحتثَّةُ 15 mV، فما شدَّةُ المجالِ المغناطيسيِّ؟

48. فرقُ الجُهدِ بين خطَّي الكهرباءِ الناقلَيْنِ للطاقةِ إلى المنازلِ يكونُ عادةً 20.0 kV. ما نسبةُ عددِ اللفّاتِ الابتدائيَّةِ إلى اللفّاتِ الثانويَّةِ في محوِّلٍ، بحيث يكونُ فرقُ الجُهدِ الثانويُّ 117 V؟

49. تُمثَّلُ ε لمولِّدٍ بالمعادلةِ $\varepsilon = 245 \sin 560\, t$ حيث تُقاسُ ε بالڤولتِ و t بالثواني. استعملْ هذه القيمَ لحسابِ تردُّدِ المصدرِ وقيمتِه القصوى.

50. للفَّيْنِ معاملُ حثٍّ متبادلٍ 1.06 H. احسبْ متوسِّطَ ε المحتثَّةِ في الدائرةِ الثانويَّةِ، إذا تغيَّرَ التيّارُ في الدائرةِ الابتدائيَّةِ من 0 A إلى 9.50 A، خلالَ فترةِ 0.0336 s.

51. لمولِّدٍ قدرةٌ كهربائيَّةٌ 5.0×10^3 kW وفرقُ جُهدٍ عندَ المخرجِ 510 kV وعندَ المدخلِ 4500 V. تقطعُ الكهرباءُ مسافةَ 6.44×10^5 m خلالَ خطٍّ توصيلٍ تبلغُ مقاومتُه في وحدةِ الطولِ $4.5 \times 10^{-4}\ \Omega/m$.

أ. ما القدرةُ المفقودةُ خلالَ نقلِ الكهرباءِ على امتدادِ خطِّ التوصيلِ؟

ب. كم ستكونُ القدرةُ المفقودةُ على خطِّ التوصيلِ إذا كان مقدارُ فرقِ جهدِ المولِّدِ 4500 V؟ ماذا يعني هذا الجوابُ بالنسبةِ إلى فروقِ الجُهدِ المرتفعةِ في نقلِ الطاقةِ؟

52. يتَّصلُ ملفٌّ معاملُ حثِّهِ الذاتيِّ $L = 15$ mH ومقاومتُه الأوميَّةُ 10 Ω على التوالي مع مكثِّفٍ سعتُه 200 μF ومقاومةٍ صرفةٍ 12 Ω. فإذا كانَ فرقُ الجُهدِ الفعّالُ لمصدرِ تيّارٍ متناوبٍ 100 V، وتردُّدُه 60 Hz احسبْ ما يلي:

أ. القيمةَ الفعّالةَ لفرقِ الجُهدِ بين طرفَيْ كلٍّ من المحث والمكثِّفِ والمقاومةِ الصرفةِ.

ب. تردُّدَ التيّارِ المتناوبِ الذي يجعلُ الدائرةَ في حالةِ رنينٍ.

.53 ملفٌّ حثّيٌّ مقاومتُه الأوميَّةُ $80\ \Omega$، وممانعتُه الحثيَّةُ $60\ \Omega$ وصِّلَ مع فرقِ جُهدٍ متناوبٍ قيمتُه الفعّالةُ $200\ V$ وتردُّدُه $60\ Hz$، أوجدْ:

أ. المعاوقةَ Z للدائرةِ.

ب. الشدَّةَ الفعّالةَ للتيّارِ المارِّ في الدائرةِ.

ج. سعةَ المكثِّفِ اللازمِ وصلُه في الدائرةِ على التوالي للحصولِ على دائرةِ رنينٍ.

د. معادلةَ الشدَّةِ اللحظيَّةِ للتيّارِ المارِّ في حالةِ الرنينِ.

.54 مصدرٌ للتيّارِ المتناوبِ، معادلةُ فرقِ الجُهدِ اللحظيِّ بين طرفَيْه تُعطى بالعلاقةِ: $V = 100\ \sqrt{2}\sin(100\ \pi t)$ وصِّلَ بينَ طرفَيْه على التوالي كلٌّ من مقاومةٍ صرفةٍ $20\ \Omega$ وملفٍّ معاملُ حثِّه الذاتيِّ $\left(\frac{3}{5\pi}H\right)$ ومقاومتُه الأوميَّةُ مهملةٌ ومكثِّفٍ سعتُه $\frac{1}{4500\pi}F$ احسب:

أ. الممانعةَ الحثّيَّةَ للملفِّ والممانعةَ السعويَّةَ للمكثِّفِ والمعاوقةَ للدائرةِ.

ب. الشدَّةَ الفعّالةَ للتيّارِ المارِّ في الدائرةِ.

.55 يتَّصلُ مكثِّفٌ سعتُه $400\ \mu F$ مع مقاومةٍ أوميَّةٍ صرفةٍ $10\ \Omega$ ومصدرٍ للتيّارِ المتناوبِ تردُّدُه $\frac{250}{\pi}Hz$ على التوالي. إذا كانَ فرقُ الجُهدِ الفعّالُ بينَ طرفَيِ المكثِّفِ $18\ V$:

أ. احسبْ فرقَ الجُهدِ الفعّالَ بين طرفَيِ المقاومةِ الصرفةِ.

ب. احسب القيمةَ القصوى لفرقِ الجُهدِ الكهربائيِّ للمصدرِ في الدائرةِ.

ج. مثِّلْ بدقةٍ، مستعينًا بالمتَّجهاتِ، كلاًّ من فرقِ الجُهدِ بينَ طرفَيِ المقاومةِ والمكثِّفِ، وفرقِ الجُهدِ الكلّيِّ المستعملِ.

.56 يتم توصيل مصدر جهد متناوب، تردُّده $1\ MHz$ وقيمته الفعالة $50\ V$، بدائرة مؤلفة من مقاومة $R = 300\ \Omega$ وملفّ نقي $X_L = 600\ \Omega$ ومكثّف $X_C = 200\ \Omega$ موصولة على التوازي. احسب:

أ. معاوقة الدائرة.

ب. القيمة الفعالة للتيار المار في كل من المقاومة والملف والمكثف

ج. القيمة الفعالة للتيار الكلّي للمصدر.

د. زاوية الطور بين التيار الكلّي وفرق جهد المصدر.

التقاريرُ والمشاريع

1. أُسقطَ مغناطيسان متشابهان من النقطةِ نفسِها، وفي اللحظةِ نفسِها. مرَّ أحدُهما من خلال ملفٍّ سلكيٍّ لدائرةٍ مغلقةٍ. هل سيصلُ المغناطيسان إلى الأرضِ في اللحظةِ نفسِها؟ وضِّحِ الأسبابَ، ثم خطِّطْ لتجربةٍ تختبرُ فيها أيٌّ من المتغيِّراتِ التاليةِ يؤثِّرُ في زمنِ سقوطِ المغناطيسَيْن: شدَّةُ المغناطيس أم مساحةُ مقطعِ الملفِّ أم عددُ لفّاتِه، ما القياساتُ التي ستقومُ بها؟ ما حدودُ دقَّةِ قياساتِك؟ احصلْ، بعد موافقةِ معلِّمِك، على الأجهزةِ المطلوبةِ، وقمْ بالتجاربِ. اعرضْ نتائجَك على زملائِك في الصفِّ، واصفًا الطريقةَ التي أجريَت فيها القياساتِ، والنتائجَ التي حصلْتَ عليها، والنواحيَ التي تحتاجُ إلى المزيدِ من البحثِ.

2. ماذا يفعلُ المنظِّمُ Adapter لفرقِ الجُهدِ والتيّارِ والتردُّدِ والقدرةِ؟ افحصِ المعلوماتِ على مداخلِ مُنظِّماتٍ متعدِّدةٍ ومخارجِها، للإجابةِ. هل تحتوي المنظِّماتُ على محوِّلٍ رافعٍ أم على محوّلٍ خافضٍ؟ ماذا يحدثُ للتردُّدِ؟ ما نسبةُ الطاقةِ التي ينقلُها المنظِّمُ؟ ولماذا يُستعمل؟

تقويم الفصل 6

اختيارٌ من متعدِّدٍ

1. أيٌّ من المعادلاتِ التاليةِ تصفُ قانونَ فارادي للحثِّ بشكلٍ صحيحٍ؟

أ. $\varepsilon = -N\dfrac{\Delta(AB\tan\theta)}{\Delta t}$

ب. $\varepsilon = N\dfrac{\Delta(AB\cos\theta)}{\Delta t}$

ج. $\varepsilon = -N\dfrac{\Delta(AB\cos\theta)}{\Delta t}$

د. $\varepsilon = M\dfrac{\Delta(AB\cos\theta)}{\Delta t}$

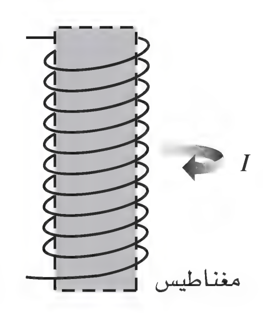
2. ما الذي يجبُ فعلُه للملفِّ أدناه من أجلِ حثِّ تيّارٍ كهربائيٍّ في اتِّجاهِ عقاربِ الساعةِ؟

أ. إما بتحريكِ القُطبِ الشماليِّ للمغناطيس إلى داخلِ الملفِّ، وإما بتحريكِ القُطبِ الجنوبيِّ للمغناطيس إلى خارجِ الملفِّ.

ب. إما بتحريكِ القُطبِ الجنوبيِّ للمغناطيس إلى داخلِ الملفِّ، وإما بتحريكِ القُطبِ الشماليِّ للمغناطيس إلى خارجِ الملفِّ.

ج. بتحريكِ أيٍّ من القطبَيْنِ إلى داخلِ الملفِّ.

د. بتحريكِ أيٍّ من القطبَيْنِ إلى خارجِ الملفِّ.



3. أيٌّ مما يلي لا يؤدّي إلى زيادةِ ε الناتجةِ عن مولِّدٍ؟

أ. تدويرُ ملفِّ المولِّدِ بشكلٍ أسرعَ.

ب. زيادةُ قوّةِ مغانطِ المولِّدِ.

ج. زيادةُ عددِ اللفّاتِ السلكيَّةِ في الملفِّ.

د. خفضُ مساحةِ مقطعِ الملفِّ

4. بأي مُعاملٍ يجبُ ضربُ القيمةِ القُصوى للقوَّةِ الدافعةِ الكهربائيَّة، لحسابِ القيمة الفعّالة للتيّارِ المتناوبِ؟

أ. 2

ب. $\sqrt{2}$

ج. $\dfrac{1}{\sqrt{2}}$

د. $\dfrac{1}{2}$

5. تمَّ سحبُ ملفٍّ من منطقةِ مجالٍ مغناطيسيٍّ من أجلِ حثِّ ε. ثمَّ أُعيدَ لفُّ السلكِ، بحيثُ زادَتْ مساحةُ مقطعِ الملفِّ مثلاً ونصف. تمَّ استعمالُ سلكٍ إضافيٍّ في الملفِّ، بحيثُ تضاعفَ عددُ اللفّاتِ. إذا تمَّ خفضُ الزمنِ اللازمِ لسحبِ الملفِّ من المجالِ إلى النصفِ، وبقيَتْ شدَّةُ المجالِ المغناطيسيِّ ثابتةً، فكم تزدادُ القوَّةُ الدافعةُ المحتثَّةُ؟

أ. مثلاً ونصفًا.

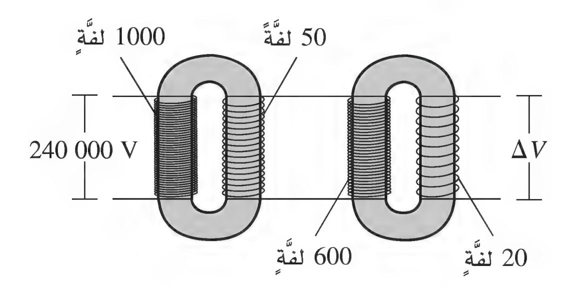
ب. مثلَين.

ج. ثلاثةَ أمثالٍ.

د. ستةَ أمثالٍ .

استعملِ النصَّ التاليَ للإجابةِ عن السؤالَيْن 6 و 7.

تمَّ وصلُ محوِّلَيْن على التوالي، كما يظهرُ في الشكلِ أدناه.



6. من اليمينِ إلى اليسارِ، ما نوعُ المحوِّلَيْن؟

أ. كلاهما محوِّلان خافضان.

ب. كلاهما محوِّلان رافعان.

ج. المحوِّلُ الأوَّلُ خافضٌ والثاني رافعٌ.

د. المحوِّلُ الأوَّلُ رافعٌ والثاني خافضٌ.

7. ما فرقُ الجُهدِ الثانويُّ عندَ الملفِّ الثانويِّ للمحوِّلِ الذي إلى اليمين؟
أ. 400 V
ب. 12000 V
ج. 160 000 V
د. 360 000 V

8. القيمةُ القصوى للتيّارِ وفرقُ الجُهدِ في دائرةِ تيّارٍ متناوبٍ هي 3.5 A، و 340 V، على التوالي. ما القدرةُ الضائعةُ في الدائرةِ؟
أ. 300 W
ب. 600 W
ج. 1200 W
د. 2400 W

أسئلةٌ ذاتُ إجابةٍ قصيرةٍ

9. للتيّارِ الكهربائيِّ المتناوبِ المارِّ في مشواةٍ كهربائيَّةٍ قيمةٌ قصوى 12.0 A. ما القيمةُ الفعّالةُ للتيّارِ؟

10. ما وظيفةُ المبدِّلِ في مولِّدِ التيّارِ المتناوبِ؟

11. لمحوِّلٍ 150 لفَّةً في ملفِّهِ الابتدائيِّ، و 75 000 لفَّةٍ في ملفِّهِ الثانويِّ. إذا كانَ فرقُ الجُهدِ الابتدائيُّ 120 V، فما فرقُ الجُهدِ الثانويُّ؟

أسئلةٌ ذاتُ إجابةٍ مطوَّلةٍ

12. لماذا يُستعملُ التيّارُ المتناوبُ في محوِّلاتِ الطاقةِ، بدلاً من التيّارِ المستمرِّ؟ تأكّدْ من تضمينِ إجابتِك القدرةَ المهدورةَ وإجراءاتِ السلامةِ الكهربائيَّةِ.

أجبْ عن الأسئلةِ 13-15 بناءً على المعلوماتِ التاليةِ:

يتضمَّنُ جهازٌ موجودٌ في مخيَّمٍ كشفيٍّ حلقةً معدنيَّةً ترتفعُ وتطيرُ فوقَ الطاولةِ عندَ مرورِ أحدِهم بالقربِ من الطاولةِ. يتألَّفُ الجهازُ من مفتاحٍ كهروضوئيٍّ يشغِّلُ الدائرةَ كلّما سارَ أحدٌ بالقربِ من المفتاحِ، ومن ملفٍّ سلكيٍّ يمرُّ فيه التيّارُ فجأةً عندَ تشغيلِ المفتاحِ.

13. لماذا يمرُّ التيّارُ في الملفِّ عندَما يمرُّ أحدُهم بالقربِ من الطاولةِ؟

14. استعملْ قانونَ لنز لتفسيرِ سببِ طيرانِ الحلقةِ إلى أعلى عندَما يمرُّ تيّارٌ متزايدٌ في الملفِّ.

15. افترضْ أن التغيُّرَ في المجالِ المغناطيسيِّ هو 0.10 T/s. إذا كانَ نصفُ قطرِ الحلقةِ 2.4 cm وهي مكوَّنةٌ من لفَّتَيْنِ من السلكِ، فما القوَّةُ الدافعةُ الكهربائيَّةُ المُحتثَّةُ في الحلقةِ؟

فكرةٌ مفيدةٌ للاختبارِ

تأكَّدْ من تحويلِ وحداتِ جميعِ الكمّيّاتِ إلى وحداتِ SI المناسبةِ.



الفصل 7

التداخلُ والحيودُ

Interference and Diffraction





الألوانُ الضوئيَّةُ التي تراها منبعثةً من قُرص مُدمج، تُذكِّرُ بالألوانِ التي تنتجُ عن دخولِ اللونِ الأبيضِ في موشورٍ. إلا أن القرصَ المُدمجَ لا يفرِّقُ الألوانَ نتيجةً للانكسارِ. إن الموجاتِ الضوئيَّةَ، في هذه الحالةِ، تتعرَّضُ للحيودِ.

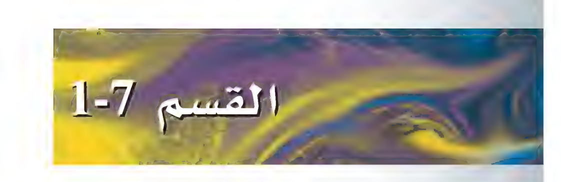
ما يُتوقعُ تحقيقُهُ

تدرسُ في هذا الفصلِ تداخلَ الضوءِ. في التداخل تتراكبُ الموجاتُ الضوئيَّةُ لتنتجَ محصِّلةَ موجاتٍ، تكونُ شدَّةُ إضاءتِها أكثرَ من الموجاتِ المكوِّنةِ أو أقلَّ.

ما أهميَّتُهُ

تستعملُ أداةٌ تُسمّى محزوزَ الحيودِ مبدأَ التداخلِ لفصلِ الضوءِ إلى مكوِّناتِه ذاتِ الأطوالِ الموجيَّةِ المختلفةِ. توجدُ محزوزاتُ الحيودِ في جهازِ مقياسِ الطيفِ (السبكتروميترِ) الذي يُستعملُ لدراسةِ التركيبِ الكيميائيِّ للنجومِ، ودرجةِ حرارتِها.

محتوى الفصل 7



التداخل

Interference

1-7 أهدافُ القسم

- يصفُ كيفَ تتداخلُ الموجاتُ الضوئيَّةُ لتكوِّنَ أهدابًا مضيئةً ومظلمةً.
- يحدِّدُ شروطَ حدوثِ التداخلِ.
- يتوقَّعُ مواقعَ أهدابِ التداخلِ باستعمالِ معادلةِ تداخلِ الشقِّ المزدوجِ.



الشكل 1-7
تتداخلُ الموجاتُ الضوئيَّةُ لتكوِّنَ حُزمًا ضوئيَّةً على سطحِ فقّاعةِ الصابونِ.

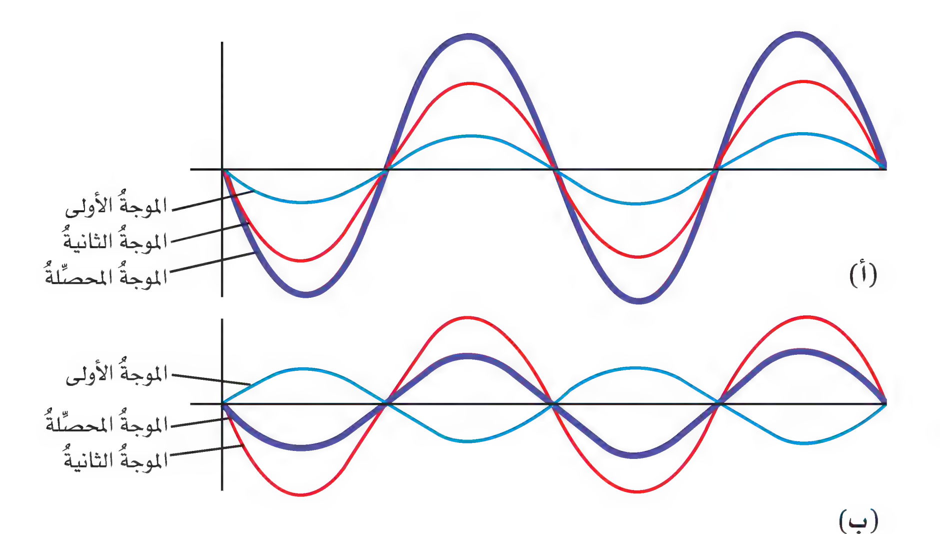
تداخلُ الموجاتِ الضوئيَّةِ

ربَّما لاحظْتَ حُزمَ الألوانِ على سطحِ فقّاعةِ صابونٍ، كما يظهرُ في **الشكل 7-1**. وبخلافِ الألوانِ الناتجةِ عن مرورِ الضوءِ في مادةٍ كاسرةٍ، تكونُ الألوانُ في هذه الحالةِ نتيجةً لتداخلِ الموجاتِ الضوئيَّةِ.

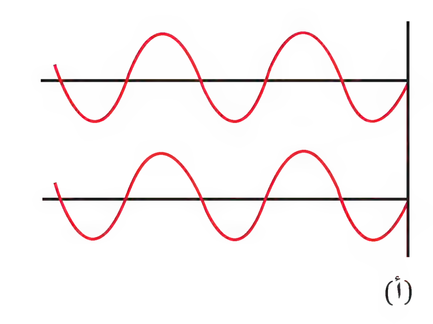
التداخلُ بينَ موجتيْن لهما الطولُ الموجيُّ نفسُه

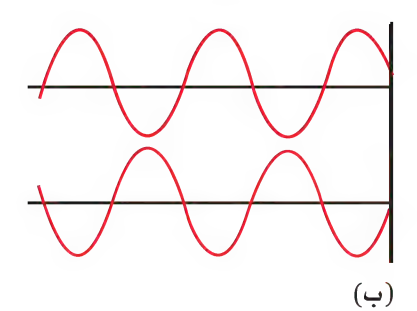
إذا تداخلَتْ موجتان لهما الطولُ الموجيُّ نفسُه، وتهتزان في آنٍ واحد وفي الوسط نفسه بمستوى واحد، فإنهما تكوِّنان موجةً محصِّلةً لها الطولُ الموجيُّ لأيٍّ من هاتين الموجتيْن. لكن، وفقَ مبدأ التراكبِ، تكونُ إزاحةُ الموجةِ المحصِّلةِ، عند أي لحظةٍ، حاصلَ جمعِ إزاحتَي الموجتيْن المتَّحدتيْن عندَ اللحظةِ نفسِها، وتكونُ الموجةُ المحصِّلةُ نتيجةً لتداخلِ الموجتيْن.

يمكنُ استعمالُ **الشكل 7-2** لوصفِ أزواجٍ من الموجاتِ الميكانيكيَّةِ أو الكهرومغناطيسيَّةِ ذاتِ الطولِ الموجيِّ الواحدِ. يُسمّى المصدرُ الضوئيُّ ذو الطولِ الموجيِّ الواحدِ الأحاديَّ اللونِ. في التداخلِ البنّاءِ تتَّحدُ الموجاتُ المكوِّنةُ لتنتجَ موجةً محصِّلةً سعتُها أكبرُ من سعةِ أيٍّ من الموجتيْن. في حالةِ الضوءِ، ينتجُ التداخلُ البناء ضوءًا أشدّ إضاءةً من الضوءِ الناتجِ عن أيٍّ من الموجتيْن المتداخلتيْن. وفي تداخلِ الإضعاف (الإتلاف غير التام) تكونُ سعةُ الموجةِ المحصَّلةِ أقلَّ من سعةِ الموجةِ الأكبرَ سعةً. أما في حالةِ التداخل الهدّام (الإتلافي) فتكون سعة الموجة المحصّلة صفرًا. في حالةِ الضوءِ، يُنتِجُ تداخل الإضعاف والتداخلُ الهدّامُ (الإتلافي) إضاءةً داكنةً أو بقعًا مظلمةً على التوالي.



الشكل 2-7
يمكنُ لموجتَين أن تتداخلا (أ) تداخلاً بنّاءً، أو (ب) بشكلِ تداخل إضعاف (تداخل إتلافي غير تام)، لا تضيعُ الطاقةُ في ظاهرةِ التداخل، بل يُعادُ توزيعُها.





الشكل 7-3

(أ) الموجتان لهما الطور نفسه، (ب) الموجتان متعاكستانِ في الطورِ.

ثباتُ فرقِ الطَّورِ بينَ موجتيْن شرطٌ للتداخلِ المستديم

من أجلِ أن تُكوِّنَ موجتانِ نمطَ تداخلٍ مستديمًا، يجبُ أن يبقى الفرقُ في الطَّورِ بينَهما ثابتًا. إذا تطابقَتْ قمَّةُ إحدى الموجتيْن مع قمَّةِ الموجةِ الأخرى، كما في **الشكل 7-3** (أ)، يكونُ الفرقُ في الطَّورِ بينَهما صفرًا، أي لهما الطور نفسه، لكن إذا تطابقَتْ قمَّةُ إحدى الموجتيْن مع قعر الموجةِ الأخرى كما في **الشكل 7-3** (ب) فيكونُ الفرقُ في الطَّورِ بينَهما $180^{\circ}\,(\pi)$، أي إنهما متعاكستان في الطورِ.

الترابط (التشاكه)

ثباتُ فرقِ الطورِ بينَ موجتيْن أو أكثرَ.

تكونُ الموجتان في حالةِ **ترابط** (**تشاكه**) coherence عندَما يكونُ فرقُ الطورِ بينَهما ثابتًا، ولا يتغيَّرُ موقعُ إحداهما من الأخرى مع مرورِ الزمنِ، وتُسمّى مصادرُ موجاتٍ كهذه مصادرَ مترابطةٍ (متشاكهة).

إذا وُضعَ مصدران ضوئيّان متقاربيْن، لا يمكنُ ملاحظةُ التداخلِ المستديمِ حتى لو كانَ لهما اللونُ نفسُه؛ سببُ ذلك أن التغيُّراتِ العشوائيَّةَ الطارئة على الضوءِ الصادرِ عن المصدرِ الأوَّلِ لا تتوافقُ بالضرورةِ مع الموجاتِ الناتجةِ عن المصدرِ الثاني. وبناءً على ذلك لا يكونُ فرقُ الطَّورِ بينَ الموجتَين ثابتًا. وتكونُ الموجتانِ لا تزالان تتداخلان، إلا أن شروطَ التداخلِ تتغيَّرُ مع أيِّ تغيُّرٍ في فرقِ الطَّورِ بينَهما. وبناءً على ذلك لا يمكنُ ملاحظةُ نمطٍ واحدٍ من التداخلِ. تكونُ المصادرُ الضوئيَّةُ من هذا النوعِ غيرَ متشاكهة.

إظهارُ التداخلِ

يمكنُ فهمُ التداخلِ الضوئيِّ الناتجِ عن مصدرَيْن ضوئيَّيْن بالطريقةِ التاليةِ: يدخلُ الضوءُ الصادرُ عن مصدرٍ ضوئيٍّ من شقٍّ ضيِّقٍ، ثم من شقَّيْن ضيِّقَيْن ومتوازيَيْن، حيث يؤدّي الشقّان المتوازيانِ دورَي المصدرَيْن المترابطَيْن، لأن الموجتَين الصادرتَيْن عنهما ناتجتانِ من مصدرٍ أساسيٍّ واحدٍ. وأيُّ تغيُّرٍ عشوائيٍّ يحدثُ في الضوءِ الصادرِ عن المصدرِ الأساسيِّ سيحدثُ في المصدرَيْن الثانويَّيْن في الوقتِ نفسِه.

إذا استعملنا ضوءًا أحاديَّ اللونِ، يُنتِجُ الضوءُ الصادرُ عن الشقَّيْن سلسلةً من الخطوطِ أو الأهدابِ المضيئةِ والمظلمةِ على شاشةٍ بعيدةٍ، كما في **الشكل 7-4**. عندَما يصلُ الضوءُ القادمُ من الشقَّينِ إلى نقطةِ تداخلٍ بنّاءٍ على شاشةِ المراقبةِ، تظهر هدبةٌ مضيئةٌ.



الشكل 7-4

يتألَّفُ نموذجُ الأهدابِ من أهدابٍ مضيئةٍ ومظلمةٍ متناوبةٍ.

عندَما يُستعملُ اللونُ الأبيضُ لملاحظةِ التداخلِ، يصبحُ الموقفُ أكثرَ تعقيدًا (الصور تظهر ملونة)، مردُّ ذلك أن الضوءَ الأبيضَ يشتملُ على موجاتٍ ذاتِ أطوالٍ موجيَّةٍ مختلفةٍ. ويوضحُ **الشكلُ 7-5** تداخلاً ناتجًا عن اللونِ الأبيضِ، ولنموذجِ التداخلِ هذا شكلٌ ثابتٌ ومحدَّدٌ عندَ مناطقِ التداخلِ البنّاءِ للموجاتِ الضوئية ذاتِ الطولِ الموجيِّ الواحدِ. يُفسِّرُ ذلك وجودَ شرائط من الألوانِ حولَ طرفَيِ الهدبةِ المركزيَّةِ المضيئةِ، كما يفسِّرُ هذا التأثيرُ شرائطَ الألوانِ على فقاقيعِ الصابونِ.

يوضحُ **الشكلُ 7-6** بعضَ الطرائقِ التي تتَّحدُ فيها موجتانِ متشاكهتانِ صادرتانِ عن الشقَّيْن، على الشاشةِ. عند وصولِ الموجتَيْن إلى المنطقةِ المركزيَّةِ من الشاشةِ، كما في **الشكل 7-6** (أ)، تكونان قد قطعتا المسافةَ نفسَها؛ لذلك تصلُ الموجتان بالطَّورِ نفسِه إلى مركزِ الشاشةِ فينتجُ تداخلٌ بنّاءٌ يؤدّي إلى هدبةٍ مضيئةٍ في تلك المنطقةِ.

عندما تتَّحدُ الموجتانِ في نقطةٍ محدَّدةٍ خارجَ مركزِ الشاشةِ، كما في **الشكل 7-6** (ب)، تكونُ الموجةُ القادمةُ من الشقِّ الأبعدِ قد سارَت طولاً موجيًّا واحدًا أكثرَ من الموجةِ القادمةِ من الشقِّ الأقربِ؛ لذلك يكونُ فرق الطور بينهما 2π، أي فرق المسار البصري بينهما يساوي طولاً موجيًّا واحدًا λ لدى وصولِهما إلى تلك النقطةِ، ويحدثُ عندَها تداخلٌ بنّاءٌ ثانٍ على الشاشةِ.

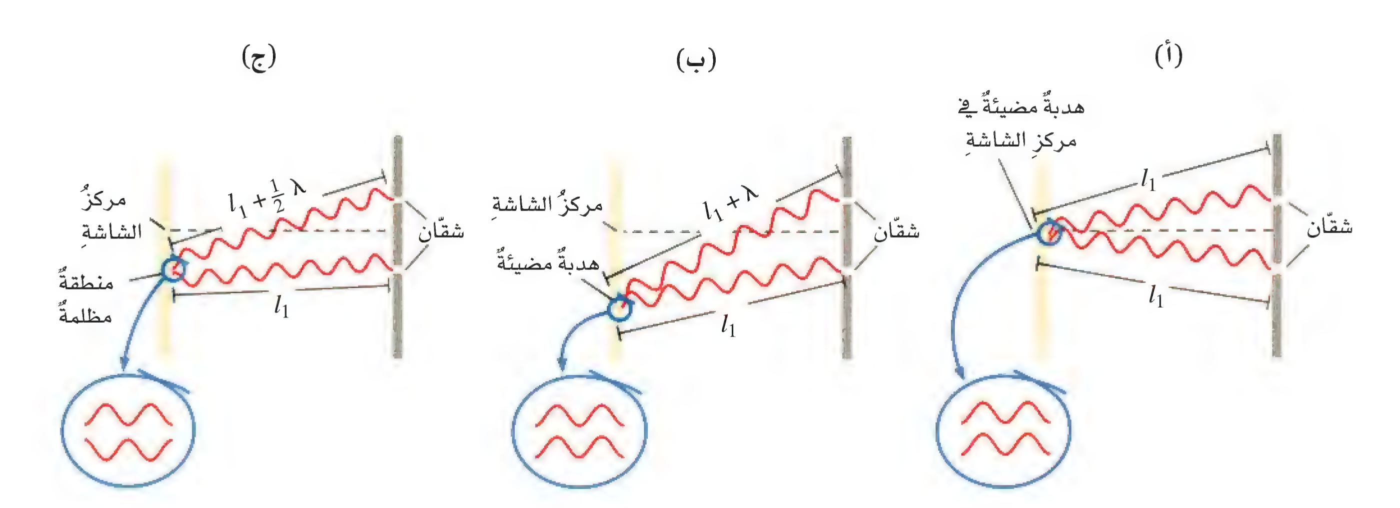
إذا التقَتِ الموجتانِ في نقطةِ الوسطِ بين الهدبتَيْن المضيئتَيْن، كما في **الشكل 7-6** (ج)، تكونُ الموجةُ الأولى قد قطعَتْ نصفَ طولٍ موجيٍّ أكثرَ من الموجةِ الثانيةِ، عندَها يتطابقُ قعرُ الموجةِ الأولى مع قمّةِ الموجةِ الثانيةِ، ويحدثُ تداخلٌ إتلافيٌ، لذلك نحصلُ على هدبةٍ مظلمةٍ بينَ كل هدبتَيْن مضيئتَيْن على الشاشةِ.



الشكل 7-5

عندَما يتداخلُ الضوءُ الأبيضُ من مصدرَيْن متشاكهين، يكونُ النموذجُ غيرَ واضحٍ، نتيجةً لتداخلِ الألوانِ المختلفةِ بشكلٍ بنّاءٍ وبشكلٍ إتلافي، عند نقاطٍ مختلفةٍ.

التنبُّؤ بمواقعِ أهدابِ التداخلِ

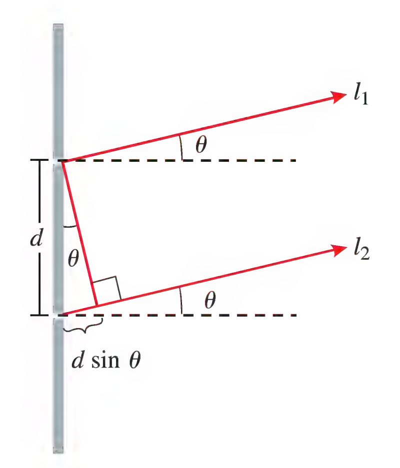


الشكل 7-6

(أ) عندَما تسيرُ كلٌّ من الموجتَيْن الضوئيَّتَيْن المسافةَ نفسَها (l_1)، تصلانِ إلى الشاشةِ بالطورِ نفسِه، وتتداخلان بشكلٍ بنّاءٍ. (ب) الفرقُ بين المسافتَيْن المقطوعتَيْن بوساطةِ الموجتَيْن يساوي طولاً موجيًّا واحدًا (λ)، تتداخلُ الموجتانِ بشكلٍ بنّاءٍ، وتكون زاوية فرق الطور بينهما 2π. (ج) الفرقُ بين المسارَيْن المقطوعَيْن يساوي نصفَ الطولِ الموجيِّ، تتداخلُ الموجتانِ بشكلٍ إتلافي.

افترضْ شقَّيْن ضيِّقَيْن بينهما المسافةُ d، كما في **الشكل 7-7**. تدخلُ موجتانِ ضوئيَّتانِ متشاكهتانِ وأحاديَّتا اللونِ هما l_1 و l_2 من هذَين الشقَّيْن لتسقطا على الشاشةِ، إذا كانَتِ المسافةُ بينَ الشقَّيْنِ والشاشةِ أكبرَ كثيرًا من المسافةِ بين الشقَّيْن، يكونُ l_1 و l_2 متوازيَيْن تقريبًا، وبناءً على ذلك تكونُ الزاويتان بينَ كلٍّ من l_1 و l_2 والخطِّ الأفقيِّ المنقَّطِ والعموديِّ على الشقَّيْن متساويتَيْن، وقيمةُ كلٍّ منهما θ. **تُحدِّدُ الزاويةُ θ أيضًا الموقعَ الذي تتَّحدُ فيه الموجتانِ من النقطةِ المركزيَّةِ على الشاشةِ.**

الفرقُ بينَ المسافتَيْن اللتَيْن تقطعُهما الموجتان يُسمّى **فرقَ المسارِ** path difference. انظرْ إلى المثلَّثِ القائمِ الزاويةِ في **الشكل 7-7** ولاحظْ أن فرقَ المسارِ بينَ الموجتَيْن يساوي $d \sin\theta$. ولاحظْ أن قيمةَ فرقِ المسارِ تتغيَّرُ بتغيُّرِ θ، وأن كلَّ قيمةٍ لـ θ تحدِّدُ موقعًا معيَّنًا على الشاشةِ.



الشكل 7-7
فرقُ المسارِ بينَ الموجتَيْنِ يساوي $d \sin \theta$. لتأكيدِ فرقِ المسارِ، لم ينفذِ الرسمُ وفقَ مقياسٍ معيَّنٍ.

تحدِّدُ قيمةُ فرقِ المسارِ إن كانَتِ الموجتانِ متَّفقتَيْنِ أو متعاكستَيْنِ في الطَّورِ لدى وصولِهما إلى الشاشةِ. إذا كانَ فرقُ المسارِ صفرًا أو عددًا صحيحًا من الأطوالِ الموجيَّةِ، تكونُ الموجتان متَّفقتَيْن في الطَّورِ (فرق الطور بينهما يساوي 0، 2π، 4π، 6π ...) وتتداخلان بشكلٍ بنّاءٍ. يُعطى شرطُ الأهدابِ المضيئةِ (التداخلِ البنّاءِ) بالعلاقةِ التاليةِ:

فرقُ المسارِ

الفرقُ بين المسافتَيْن اللتَين تقطعُهما موجتان تصدران من مصدرَيْن عند وصولِهما إلى نقطةٍ واحدةٍ.

معادلةُ التداخلِ البنّاءِ

$$d \sin \theta = \pm m\lambda \qquad m = 0,1,2,3,...$$

فرقُ المسارِ بينَ الموجتَيْن = أعدادًا صحيحة من الأطوالِ الموجيَّةِ

في هذه المعادلةِ تعبِّرُ m عن **رقمِ الرتبةِ** order number للهدبةِ. تُسمّى الهدبةُ المركزيَّةُ عند $\theta = 0$ ($m = 0$) الهدبةَ المضيئةَ الصفريَّةَ، أو الهدبةَ المضيئةَ المركزيَّةَ. بينَما تُسمّى أوَّلُ هدبةٍ مضيئةٍ حول طرفَي الهدبةِ المضيئةِ المركزيَّةِ، الهدبةَ المضيئةَ الأولى، وهكذا...

رقمُ الرتبةِ

رقمُ الهدبةِ قياسًا على الهدبةِ المضيئةِ المركزيَّةِ.

وعندَما يكونُ فرقُ المسارِ بينَ الموجتَين عددًا مفردًا من أمثالِ $\frac{1}{2}\lambda$، يكونُ الفرقُ في الطَّورِ بينَ الموجتَيْن الواصلتَيْن إلى الشاشةِ π، 3π، 5π، وينتجُ عنه تداخلٌ إتلافيٌّ. يُعطى شرطُ الهدبةِ المظلمةِ، أو التداخلِ الإتلافيِّ، بالعلاقةِ التاليةِ:

معادلةُ التداخلِ الهدّامِ (الإتلافيِّ)

$$d \sin \theta = \pm (m + \tfrac{1}{2})\lambda \qquad m = 0,1,2,3,...$$

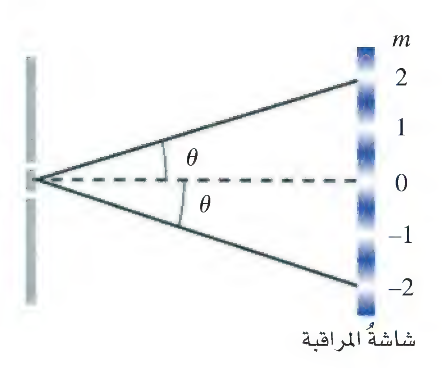
فرقُ المسارِ بينَ الموجتَيْن = عددًا مفردًا من أمثالِ نصفِ الطولِ الموجيِّ

إذا كانَتْ $m = 0$، يكونُ فرقُ المسارِ $\pm\frac{1}{2}\lambda$، وهو الشرطُ المطلوبُ للحصولِ على الهدبةِ المظلمةِ الأولى، حولَ طرفَي الهدبةِ المضيئةِ المركزيَّةِ. وعندَما تكونُ $m = 1$، يكونُ فرقُ المسارِ $\pm\frac{3}{2}\lambda$، وهو شرطُ الهدبةِ المظلمةِ الثانيةِ، حولَ طرفَي الهدبةِ المضيئةِ المركزيَّةِ، وهكذا...

يمثِّلُ **الرسمُ 8-7** نموذجَ تداخلٍ ناتجٍ عن شقَّيْن. تمثِّلُ الأرقامُ القيمَ القصوى

للأهدابِ المضيئةِ حولَ طرفَي الهدبة المضيئة المركزيَّة. وتمثِّلُ المناطقُ الأشدُّ ظلمةً الأهدابَ المظلمةَ، أو القيمَ الدنيا، في نموذجِ التداخل.

ولما كانَتِ المسافةُ بينَ أهدابِ التداخلِ على الشاشةِ تتغيَّرُ بتغيُّرِ الطولِ الموجيِّ للضوءِ، فإنَّ تداخلَ الشقَّينِ يوفِّرُ طريقةً لقياسِ الطولِ الموجيِّ للضوءِ، وفي الحقيقةِ، كانَت هذه أوَّلَ طريقةٍ استُعمِلتْ لقياسِ الطولِ الموجيِّ للضوءِ.



الشكل 7-8

تبدو الأهدابُ المضيئةُ ذاتُ الترتيبِ الأعلى ($m = 1,2$) على جانبَي الهدبةِ المضيئةِ المركزيَّةِ ($m = 0$).

مثال 7 (أ)

التداخل

المسألة

تبلغُ المسافةُ بين شقَّيْن 0.030 mm. تبدو الهدبةُ المضيئةُ الثانيةُ على الشاشةِ من خلالِ زاويةِ $\theta = 2.15°$ مع الهدبةِ المركزيَّةِ. احسبِ الطولَ الموجيَّ للضوءِ.

الحلّ

1. أعرِّف

المعطى: $d = 3.0 \times 10^{-5}$ m $m = 2$ $\theta = 2.15°$

المجهول: $\lambda = ?$

الرسم:

الهدبةُ المضيئةُ الثانيةُ ($m = 2$)
الهدبةُ المضيئةُ الصفريَّةُ
$d = 0.030$ mm
$\theta = 2.15°$
رسمٌ غيرُ خاضعٍ لمقياسٍ

2. أخطِّط

أختارُ معادلةً أو موقفًا: أستعملُ معادلةَ التداخلِ البنّاءِ.

$$d \sin \theta = m\lambda$$

أعيدُ ترتيبَ المعادلةِ لعزلِ المجهولِ:

$$\lambda = \frac{d \sin \theta}{m}$$

3. أحسب

أعوِّضُ القيمَ في المعادلةِ وأحلُّ:

$$\lambda = \frac{(3.5 \times 10^{-5}\ \text{m})(\sin 2.15°)}{2}$$

$$\lambda = 5.6 \times 10^{-7}\ \text{m} = 5.6 \times 10^{2}\ \text{nm}$$

$$\boxed{\lambda = 5.6 \times 10^{2}\ \text{nm}}$$

جوابُ الآلةِ الحاسبةِ

بما أن أقلَّ عددٍ للأرقامِ المعنويَّةِ في البياناتِ هو 2، فيجبُ تقريبُ الجوابِ 5.627366×10^{-7} m إلى رقمَيْن معنويَّيْن فيصبح 5.6×10^{2} nm.

4. أقيِّم

يقعُ الطولُ الموجيُّ لهذا الضوءِ ضمنَ الطيفِ المرئيِّ، وهو يختصُّ باللونِ الأخضرِ – الأصفر.

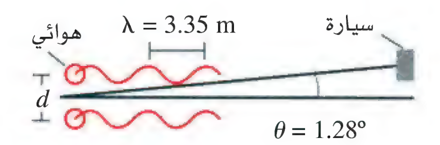
تطبيق 7 (أ)

التداخل

1. يسقطُ الضوءُ على شقَّيْن تفصلُ بينَهما مسافةُ 2.02×10^{-6} m وتقعُ الهدبةُ المضيئةُ الأولى على زاويةِ 16.5° مع الهدبةِ المضيئةِ المركزيَّةِ، احسبِ الطولَ الموجيَّ للضوءِ المستعمل.
2. أضيءَ شقّان ضيّقان ومتوازيان، بينَهما مسافةُ 0.250 mm، باللونِ الأخضرِ الصادرِ عن مصباحِ بخارٍ زئبقيٍّ ($\lambda = 546.1$ nm)، احسبِ الزاويةَ بين الهدبةِ المركزيَّةِ والهدبةِ المضيئةِ الأولى حولَ طرفَيْها.
3. استعملِ البياناتِ في السؤالِ 1 لحسابِ الزاويةِ بينَ الهدبةِ المركزيَّةِ والهدبةِ المظلمةِ الثانيةِ، في نموذجِ التداخلِ.

مراجعةُ القسم 1-7

1. ما الشرطُ الضروريُّ لفرقِ المسارِ الضوئيِّ بينَ موجتَين للحصولِ على تداخلٍ بنّاءٍ؟ وعلى تداخلٍ إتلافيٍّ؟
2. إذا استُعملَ الضوءُ الأبيضُ بدلاً من الضوءِ الأحاديِّ اللون لتحقيقِ التداخلِ، فكيف يتغيَّرُ نموذجُ التداخل؟
3. إذا كانَتِ المسافةُ بين الشقَّيْن 0.0550 mm، فاحسبِ الزاويةَ بينَ الهدبةِ المضيئةِ الأولى والهدبةِ المضيئةِ الثانيةِ للونِ الأصفرِ ذي الطولِ الموجيِّ 605 nm.
4. **تفسيرُ الرسوم:** يُصدرُ هوائيٌّ لاسلكيٌّ موجتَيْن متشاكهتَيْن بطولٍ موجيٍّ 3.35 m، كما في **الشكلِ 7-9**، ويستقبلُ جهازُ راديو الإشارتَيْن من داخلِ سيارةٍ تسيرُ موازيةً للخطِّ الذي يصلُ الهوائيَّيْن. إذا كانَتِ الهدبةُ المضيئةُ الثانيةُ تُرصدُ من خلالِ زاويةِ 1.28° شمالَ الهدبةِ المضيئةِ المركزيَّةِ للموجتَيْن المتداخلتَيْن، فكم تكونُ المسافةُ d بينَ الهوائيَّيْن؟



الشكل 7-9



الحيود
Diffraction

2-7 أهدافُ القسمِ

- يصفُ كيف تنحرفُ الموجاتُ الضوئيَّةُ عندَ العوائقِ، وكيفَ تُكوِّنُ أهدابًا مضيئةً ومظلمةً.
- يحسبُ مواقعَ الأهدابِ في محزوزِ الحيودِ.

حيودُ الموجاتِ الضوئيَّةِ

إذا وقفْتَ بالقربِ من زاويةِ مبنى، تستطيعُ سماعَ صوتِ شخصٍ يتحدَّثُ في الناحيةِ الأخرى مع أنك لا تراه؛ مردُّ ذلك أن الموجاتِ الصوتيَّةَ تستطيعُ الانحرافَ عن مسارِها عندَ الزوايا، كما أن الموجاتِ المائيَّةَ تنحرفُ عن مسارِها لدى اصطدامِها بعائقٍ أو سدٍّ، كما هو موضَّحٌ في **الشكل 10-7**. كذلك تنحرفُ الموجاتُ الضوئيَّةُ عندَ جانبَيّ عائقٍ، إلا أن انحرافَها قليلٌ جدًّا، وتصعبُ ملاحظتُه بسببِ صغرِ طولِها الموجيِّ.

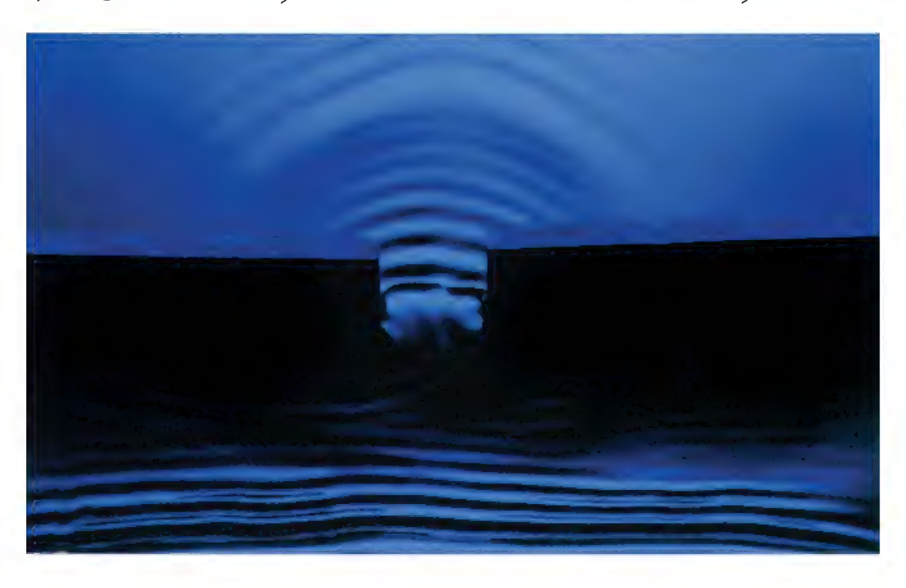
إذا كانَ الضوءُ يسيرُ في خطوطٍ مستقيمةٍ فقطْ، فلا يمكنُك ملاحظةُ نموذجِ تداخلٍ في تجربةِ الشقِّ المزدوجِ. وبدلاً من ذلك ترى شريطَيْنِ رفيعَيْنِ من الضوءِ متراصَّيْنِ مع الشقَّيْنِ والمصدرِ الضوئيِّ، ويكونُ باقي الشاشةِ مُظلمًا تمامًا، وستظهرُ للشقَّيْنِ على الشاشةِ ظلالٌ واضحةٌ ومحدَّدةُ الأطرافِ. إلا أن هذا لا يحدثُ فعلاً؛ ذلك أن بعضَ الأشعَّةِ تنحرفُ يمينًا ويسارًا لدى دخولِها في الشقَّيْنِ.

يمكنُ فهمُ انحرافِ الضوءِ لدى دخولِه في كلٍّ من الشقَّيْنِ، باستعمالِ مبدأ هيكنز الذي ينصُّ على التالي: يمكنُ اعتبارُ كلِّ نقطةٍ على جبهةِ موجةٍ مصدرًا للموجاتِ. ولأننا نُعدُّ كلَّ شقٍّ مصادرَ نقطيَّةً للضوءِ، فإن الموجاتِ تنتشرُ من الشقَّيْنِ، وتكون النتيجةُ انحرافَ الضوءِ عن مسارِه الأصليِّ، ودخولَهُ مناطقَ يفترضُ أن تكونَ مظلمةً. يُسمّى انحرافُ الضوءِ هذا عن خطِّ سَيرِه الأساسيِّ **حيودًا** diffraction.

يحدثُ الحيودُ، بشكلٍ عامٍّ، لدى اصطدامِ الموجاتِ بثقوبٍ صغيرةٍ، أو عندَ العوائقِ أو الأطرافِ الحادَّةِ. عندَما يوضعُ شقٌّ عرضُهُ (1 mm أو أكثر) بينَ مصدرٍ ضوئيٍّ بعيدٍ وشاشةٍ، نرى على الشاشةِ منطقةً مضيئةً مستطيلةَ الشكلِ ومحدَّدةَ الأطرافِ. لكن إذا قمْنا بتضييقِ الشقِّ تدريجيًّا، تبدأ منطقةُ الضوءِ بالاتساعِ، مما يُنتجُ نموذجَ حيودٍ،

الحيود

انحرافُ اتِّجاهِ موجةٍ لدى اصطدامِها بسلكٍ رفيعٍ أو ثقبٍ صغيرٍ أو شقٍّ ضيِّقٍ أو حافةٍ حادَّةٍ، وانتشارُها خلفَ هذه العوائقِ.



الشكل 10-7

من خصائصِ الموجاتِ كافَّةً انحرافُها أو حيودُها حولَ الأجسامِ والعوائقِ.

كالموضَّح في **الشكل 7-11**. وكما في حالةِ أهدابِ التداخلِ في تجربةِ الشقِّ المزدوجِ، فإن هذا النموذجَ من الأهدابِ المضيئةِ والمظلمةِ، ينتجُ من اتِّحادِ الموجاتِ الضوئيَّةِ.

تداخلُ الموجاتِ الثانويَّةِ على جبهةِ الموجة

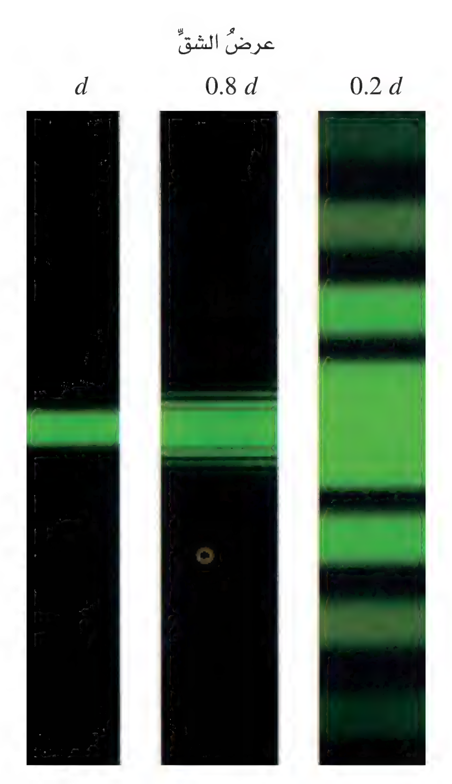
تتشابهُ نماذجُ الحيودِ مع نماذجِ التداخلِ، لأنها هي أيضًا تنتجُ عن تداخلٍ بنّاءٍ وآخرَ إتلافيٍّ. في ظاهرةِ التداخلِ، نفترضُ أن كلاًّ من الشقَّيْن يبدو كمصدرٍ ضوئيٍّ نقطيٍّ، لكن في حالةِ الحيودِ، نراعي العرضَ الحقيقيَّ لكلِّ شقٍّ.

وفقَ مبدأ هيكنز، تتصرَّفُ كلُّ نقطةٍ من الشقِّ كمصدرٍ ثانويٍّ للموجاتِ، لذلك يمكنُ أن يتداخلَ الضوءُ الآتي من نقطةٍ معيَّنةٍ من الشقِّ مع الضوءِ القادمِ من نقطةٍ أخرى من الشقِّ نفسِه. وتعتمدُ شدَّةُ محصِّلةِ الضوءِ المنحرفِ، والساقطِ على الشاشةِ، على الزاويةِ التي ينحرفُ الضوءُ باتِّجاهِها.

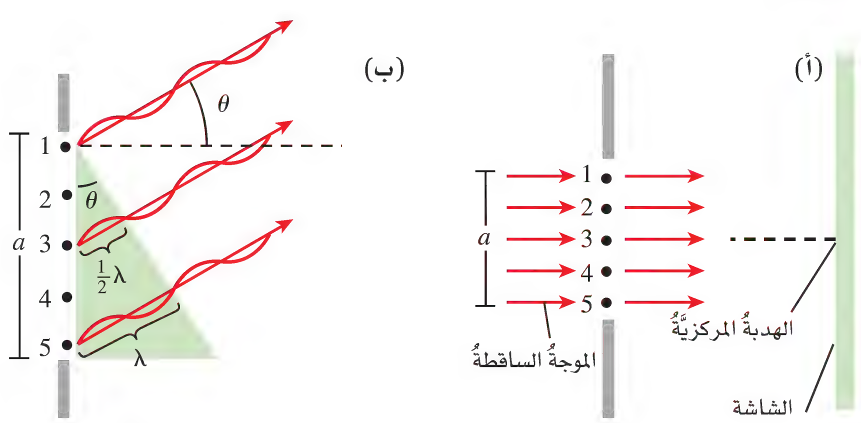
لفهمِ نموذجِ حيودِ الشقِّ المنفردِ، افترضِ **الشكلَ 7-12** (أ) الذي يُظهِرُ موجةً مستويةً ساقطةً على شقٍّ عرضُه a. كلُّ نقطةٍ (أو بالأحرى كل شقٍّ متناهي الصغرِ) من الشقِّ الأصليِّ العريضِ هو مصدرٌ من موجاتِ هيكنز. يظهرُ في الشكلِ المبسَّطِ خمسةُ مصادرَ فقطْ من المصادرِ اللانهائيَّةِ العددِ، وكما في حالةِ تداخلِ الشقِّ المزدوجِ، نفترضُ أن الشاشةَ بعيدةٌ جدًّا عن الشقِّ، بحيث يمكنُنا اعتبارُ الأشعَّةِ الخارجةِ من الشقوقِ شبهَ متوازيةٍ. وعندَ مركزِ الشاشةِ تكونُ كلُّ الأشعَّةِ القادمةِ من الشقِّ قد قطعتِ المسافةَ نفسَها، لذلك تظهرُ هدبةٌ مضيئةٌ في تلك البقعةِ.

يمكنُ لموجاتِ المصادرِ الثانويَّةِ الخمسةِ أن تتداخلَ أيضًا بشكلٍ إتلافيٍّ، لدى وصولِها إلى الشاشةِ، كما هو موضَّحٌ في **الشكل 7-12** (ب). عندَما تكونُ المسافةُ الإضافيَّةُ التي تقطعُها الموجةُ القادمةُ من النقطةِ 3 نصفَ الطولِ الموجيِّ مقارنةً بالمسافةِ التي تقطعُها الموجةُ القادمةُ من النقطةِ 1، فإن هاتَيْن الموجتَيْن تتداخلانِ على الشاشةِ بشكلٍ إتلافيٍّ. وفي الوقتِ نفسِه، تكونُ الموجةُ القادمةُ من النقطةِ 5 قد قطعَتْ مسافةَ نصفِ طولٍ موجيٍّ إضافيٍّ، مقارنةً بالمسافةِ التي تقطعُها الموجةُ القادمةُ من النقطةِ 3، ويكونُ تداخلُ هاتَيْن الموجتَيْن إتلافيًّا أيضًا. إذا تداخلَ كلُّ زوجٍ من الموجاتِ بشكلٍ إتلافيٍّ، تكوِّنُ تلك النقطةُ من الشاشةِ هدبةً مظلمةً.

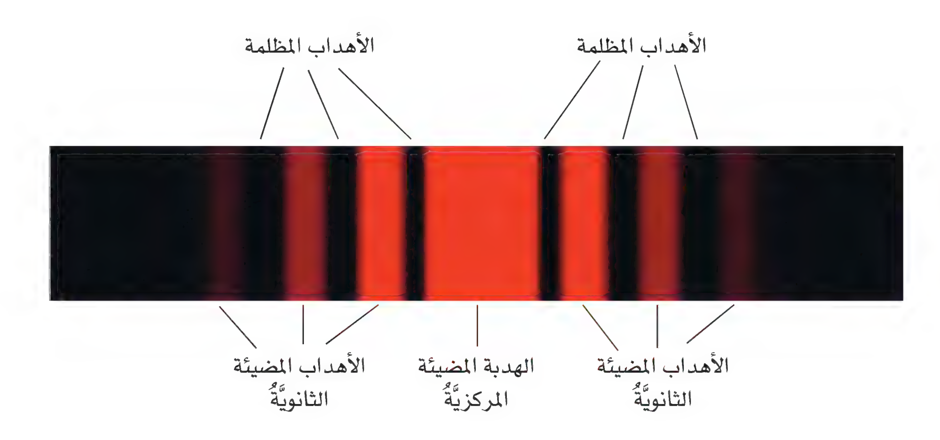
عند الزوايا الأخرى حيث لا يحدثُ تداخلٌ إتلافيٌّ بالكاملِ، يبقى قسمٌ من الضوءِ عندَ تلك الزوايا فيبدو الضوءُ على الشاشةِ جزءًا من هدبةٍ مضيئةٍ. أسطعُ الأهدابِ المضيئةِ تبدو في منتصفِ الشاشةِ، بينما تقلُّ شدَّةُ الأهدابِ المضيئةِ حولَ طرفَيْها تدريجًا.



الشكل 7-11
يصبحُ الحيودُ أوضحَ كلَّما نقصَ عرضُ الشقِّ. (ملاحظة: الطولُ الموجيُّ للضوءِ المستعمل 510 nm.)



الشكل 7-12
(أ) باعتبارِ الضوءِ النافذِ من الشقِّ شعاعًا من مصدرٍ بالغِ الدقَّةِ يسيرُ باتجاهِ عرضِ الشقِّ، (ب) يمكنُ تحديدُ الشروطِ التي يحدثُ وفقَها تداخلٌ إتلافي بينَ الموجاتِ القادمةِ من الجزءِ العلويِّ للشقِّ والموجاتِ القادمةِ من الجزءِ السفلي.



الشكل 7-13
يبلغُ عرضُ الهدبةِ المضيئةِ المركزيَّةِ في نموذجِ الحيود ضعفَ عرضِ الأهدابِ الثانويةِ.

النموذجُ الناتجُ عن حيودِ الضوءِ عندَ عائقٍ

يتألَّفُ نموذجُ الحيودِ الناتجِ عن ضوءٍ أحاديِّ اللونِ عندَ شقٍّ منفردٍ من شريطٍ مركزيٍّ مضيءٍ، هو الهدبة المضيئة المركزيَّةُ، تحيطُ به سلسلةٌ من شرائطَ ثانويَّةٍ أقلُّ إضاءةً (تُسمّى الأهداب المضيئة الثانويَّةَ)، وسلسلةٌ أخرى من الشرائطِ المظلمةِ ذاتِ القيمِ الدنيا تسمّى الأهداب المظلمة. يوضحُ **الشكلُ 7-13** أحدَ أمثلةِ هذا النموذجِ. تقعُ مناطقُ التداخلِ البنّاءِ ذاتُ الأهداب المضيئة في منتصفِ المسافةِ تقريبًا بينَ الأهدابِ المظلمةِ. لاحظْ أن للهدبةِ المركزيةِ شدَّةَ إضاءةٍ أكبرَ، وأن عرضَها يبلغُ تقريبًا ضعفَ الهدبةِ المضيئةِ التاليةِ.

يحدثُ الحيودُ عندَ أطرافِ الأجسامِ كافّةً. يُظهرُ **الشكلُ 7-14** نموذجَ الحيودِ الذي يظهرُ في ظلِّ قطعةِ نقودٍ معدنيَّةٍ. يتألَّفُ النموذجُ من ظلٍّ مع بقعةٍ مضيئةٍ عندَ مركزِه تحيطُ بها سلسلةٌ من الأهدابِ المضيئةِ والمظلمةِ التي تمتدُّ حتى حافةِ الظلِّ. وبما أن مقياسَ قطعةِ النقودِ كبيرٌ قياسًا على الطولِ الموجيِّ للضوءِ، نحتاجُ إلى عدسةٍ مكبِّرةٍ لمشاهدةِ النموذجِ.

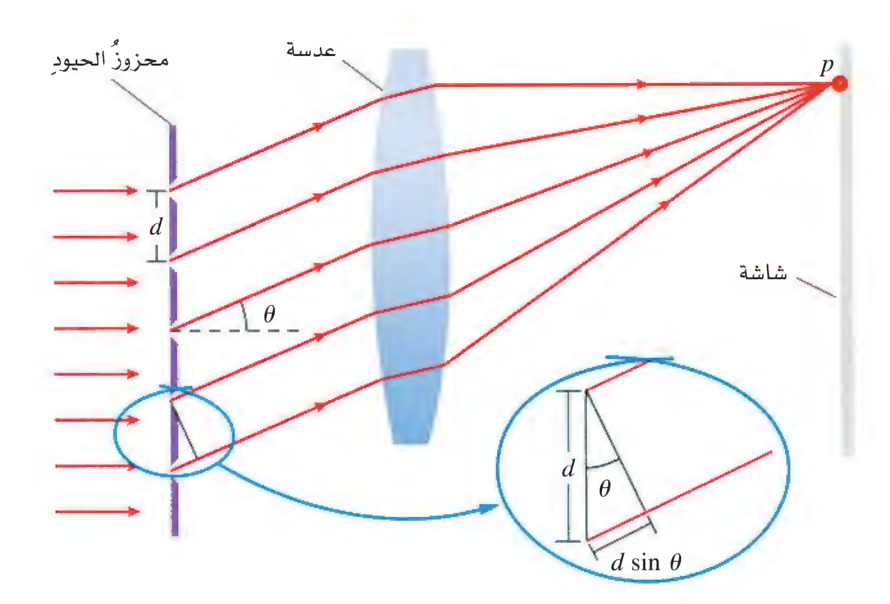


الشكل 7-14
يظهرُ نموذجُ حيودٍ خلالَ ظلِّ قطعةِ نقودٍ معدنيَّةٍ، عندما ينحرفُ الضوءُ عندَ أطرافِها. لاحظِ البقعةَ المضيئةَ عندَ مركزِ الظلِّ.

محزوزُ الحيودِ

ربما لاحظْتَ شرائطَ من الألوانِ المختلفةِ على قُرصٍ مُدمجٍ لدى سقوطِ الضوءِ الأبيضِ عليه. تظهرُ هذه الشرائطُ، لأن المعلوماتِ الرقميَّةَ (الحزوزَ المتواليةَ والسطوحَ العاكسةَ) على القرصِ، تُكوِّنُ صفوفًا متراصَّةً. لا تعكسُ تلك الصفوفُ من المعلوماتِ مقدارًا مساويًا للضوءِ الذي ينعكسُ من مناطقِ القرصِ الضيِّقةِ التي تفصلُ بينَها. وتتألَّفُ تلك المناطقُ كليًّا من موادَّ عاكسةٍ، بحيثُ يتعرَّضُ الضوءُ المنعكسُ منها لتداخلٍ بنّاءٍ في اتِّجاهاتٍ معيَّنةٍ. ويعتمدُ التداخلُ البنّاءُ هذا على اتِّجاهِ سقوطِ الضوءِ، وموضعِ القرصِ، والطولِ الموجيِّ للضوءِ. ويمكنُ رؤيةُ كلِّ طولٍ موجيٍّ من زاويةٍ محدَّدةٍ مع سطحِ القرصِ، فترى بذلك ألوانَ قوسِ المطرِ، كما في **الشكل 7-15**.

الشكل 7-15
يشتِّتُ القرصُ المدمجُ الضوءَ إلى ألوانِه الأساسيَّةِ بطريقةٍ مشابهةٍ لمحزوزِ الحيودِ.



الشكل 7-16
يدخلُ ضوءٌ ذو طولٍ موجيٍ واحدٍ من كلِّ شقٍّ لمحزوزِ حيودٍ، ويتداخلُ بشكلٍ بنّاءٍ عندَ زاويةِ انحرافِ θ.

تمَّ استعمالُ هذهِ الظاهرةِ عمليًّا من خلالِ أداةٍ تُسمّى محزوزَ الحيودِ. يصنَّعُ محزوزُ الحيودِ بحيثُ يسمحُ بنفاذِ الضوءِ أو انعكاسِه. ويستعملُ الحيودَ أو التداخلَ لتشتيتِ الضوءِ إلى ألوانِه الأوليَّةِ، كما يحدثُ لدى مرورِه داخلَ موشورٍ زجاجيٍّ. يتألَّفُ محزوزُ النفاذِ من شقوقٍ كثيرةٍ متوازيةٍ تفصلُ بينَها أبعادٌ متساويةٌ. تُصنعُ الحزوزُ بشقِّ خطوطٍ متساويةِ الأبعادِ على قطعةٍ من الزجاجِ، باستعمالِ رأسٍ حادٍّ مصنوعٍ من الماسِ، يدفعُه محرِّكٌ للقطعِ، ويُصبُّ بعدَ ذلك بلاستيكٌ سائلٌ على المحزوزِ، ثم يُنزعُ محزوزُ البلاستيكِ بعد أن يجفّ. يثبَّتُ محزوزُ البلاستيكِ، بعد ذلك، على قطعةِ زجاجٍ أو بلاستيكٍ لحملِه.

يوضحُ **الشكلُ 7-16** رسمًا تخطيطيًّا لمقطعٍ من محزوزِ حيودٍ، تسقطُ موجةٌ مستويةٌ أحاديةُ اللونِ رأسيًّا من جهةِ اليسارِ على المحزوزِ، فتخرجُ الموجاتُ من المحزوزِ شبهَ متوازيةٍ، ثم تتجمَّعُ عندَ نقطةِ p على الشاشةِ، بوساطةِ عدسةٍ لامَّةٍ. وتنتجُ شدَّةُ النموذجِ على الشاشةِ من تأثيراتٍ من التداخلِ والحيودِ، فكلُّ شقٍّ يُنتجُ حيودًا، ثم تتداخلُ الأشعَّةُ الناتجةُ من الحيودِ لتعطيَ النموذجَ المتشكّل. ومهما تكن الزاويةُ العشوائيَّةُ θ، للمسارِ الأساسيِّ للموجاتِ، فإن الموجاتِ تقطعُ مساراتٍ مختلفةَ الأطوالِ قبلَ الوصولِ إلى نقطةِ p على الشاشةِ. لاحظْ أن فرقَ المسارِ بينَ أي موجتَيْن قادمتَيْن من شقَّيْن متجاورَيْن هو $d \sin\theta$. إذا كانَ هذا الفرقُ في المسارِ يساوي طولاً موجيًّا، أو عددًا صحيحًا من الأطوالِ الموجيَّةِ، تكونُ جميعُ الموجاتِ متساويةَ الطَّورِ لدى وصولِها إلى النقطةِ p، حيثُ يلاحظُ خطٌّ مضيءٌ عندَها. لذلكَ يُعطى شرطُ الهدبةِ المضيئةِ عندَ زاويةِ θ بمعادلةِ التداخلِ البنّاءِ:

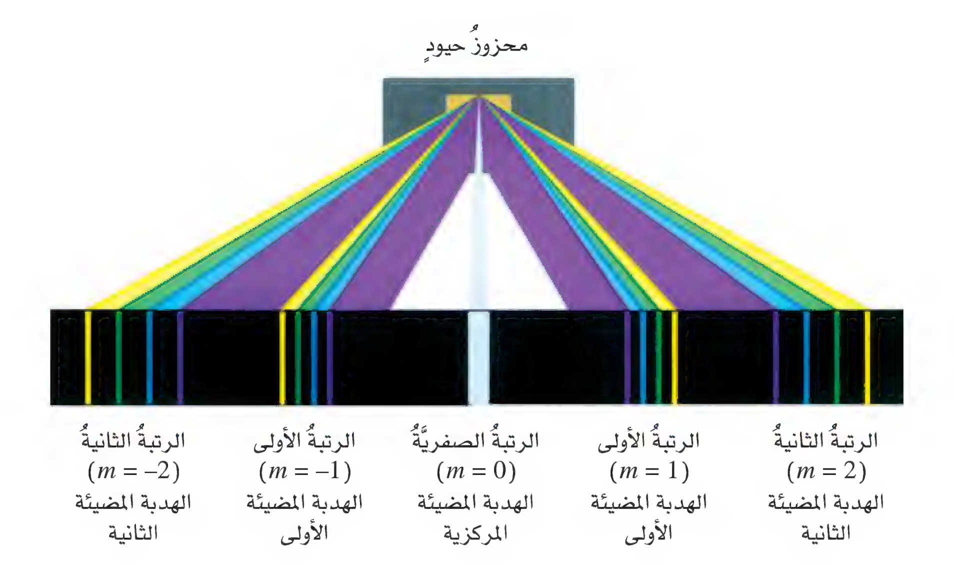
$$d \sin \theta = \pm m\lambda \qquad m = 0,1,2,3,...$$

يمكنُ استعمالُ تلك المعادلةِ لحسابِ الطولِ الموجيِّ للضوءِ، بمعرفةِ البُعدِ بينَ كلِّ شقَّيْن متتاليَيْن على المحزوزِ وزاويةِ الانحرافِ. ويدلُّ العددُ الصحيحُ m على رتبةِ الهدبةِ المضيئةِ لطولٍ موجيٍّ معيَّنٍ. إذا اشتملَتِ الأشعَّةُ الساقطةُ على عدَّةِ أطوالٍ موجيَّةٍ، فإن كلَّ طولٍ موجيٍّ ينحرفُ بزاويةٍ معيَّنةٍ يمكنُ حسابُها من خلالِ المعادلةِ الواردةِ أعلاه.

الفيزياءُ والحياة

1. النجومُ المتلألئةُ تشير صورُ النجومِ دائمًا إلى وجودِ نتوءاتٍ فيها. وضِّحْ كيفَ يحدثُ حيودٌ لتلك النتوءاتِ، علمًا بأن للفتحةِ المستطيلةِ لغالقِ آلةِ التصويرِ أضلاعًا مستقيمةً.

2. الحيودُ اللاسلكيُّ لا يُلاحظُ حيودُ موجاتِ الضوءِ المرئيَّةِ عندَ زوايا المباني أو العوائقِ الأخرى. إلا أن موجاتِ الراديو اللاسلكيَّةَ يمكنُ التقاطُها من خلفِ المباني والجبالِ، حتى مع عدمِ رؤيةِ عمودِ الإرسالِ. علِّلْ وضوحَ حيودِ موجاتِ الراديو، بالمقارنةِ مع الموجاتِ المرئيَّةِ.

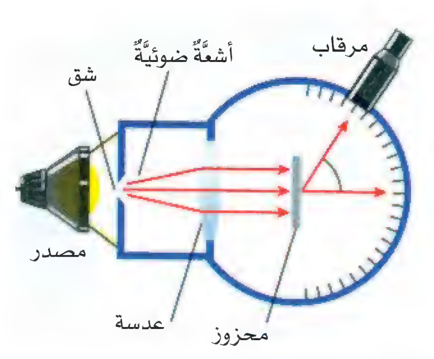


الشكل 7-17

يشتِّتُ الضوءُ بوساطةِ محزوزِ حيودٍ. وتكونُ زاويةُ الانحرافِ لرتبةِ الهدبة المضيئة الأولى للون الأصفر أكبرَ مقارنةً مع اللونِ الأزرق.

لاحظْ في **الشكل 7-17** أن كلَّ الأطوالِ الموجيَّةِ تتَّحدُ عند $\theta = 0$ الناتجةِ عن $m = 0$. تُسمّى تلك المنطقةُ الهدبة المضيئة المركزية. أما الهدبة المركزية الأولى التي تنتجُ عن $m = 1$، فإنها تقعُ على زاويةِ θ وتحقِّقُ العلاقةَ $\sin \theta = \frac{\lambda}{d}$.

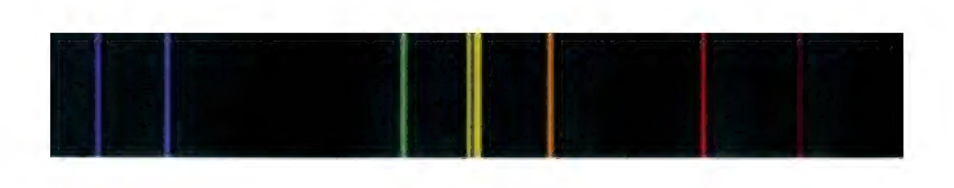
تعتمدُ شدَّةُ إضاءةِ الهدبة المضيئة المركزية، والنطاقُ العريضُ للمناطقِ المظلمةِ، على عددِ الخطوطِ في المحزوز. ويُساوي عددُ خطوطِ المحزوزِ في وحدةِ الطولِ مقلوبَ المسافةِ d بينَ أيِ خطَّيْن متجاورَيْن. فالمحزوزُ ذو 5000 خطٍّ لكل 1 cm، مثلاً، تكونُ المسافةُ بينَ أيٍّ من شقَّيْه (ثابت المحزوز) $d = 1/5000 = 2 \times 10^{-4}$ cm. وكلَّما ازدادَ عددُ الخطوطِ في وحدةِ الطولِ تقصُرُ المسافةُ بين الشقوقِ المتجاورةِ. وتطولُ المسافةُ بين أهدابِ الأطوالِ الموجيَّةِ المختلفة.



الشكل 7-18

يستعملُ المطيافُ محزوزًا لتشتيتِ الأشعَّةِ القادمةِ من مصدرٍ معيَّن.

يُستعملُ محزوزُ الحيودِ غالبًا في جهازٍ يُسمّى المطيافَ. يحلِّل المطيافُ الضوءَ الناتجَ عن مصدرٍ معيَّن إلى مكوِّناتِه الأحاديةِ اللونِ. ويوضحُ **الشكلُ 7-18** المكوِّناتِ الأساسيَّةَ للمطيافِ، حيث يدخلُ الضوءُ المرادُ تحليلهُ من شقٍّ، ويحوَّلُ إلى حزمةٍ ضوئيَّةٍ متوازيةٍ، بوساطةِ عدسةٍ لامَّةٍ، ثم يدخلُ في المحزوزِ، وينحرفُ الضوءُ الخارجُ من المحزوزِ بزوايا تحقِّقُ معادلةَ محزوزِ الحيودِ. ويُستعملُ تلسكوبٌ ذو مقياسٍ مُدرَّجٍ لمشاهدةِ الأهدابِ المضيئةِ الأولى، وقياسِ زوايا انحرافِها. ويمكنُ، عند ذلك، حسابُ الطولِ الموجيِّ للضوءِ، باستعمالِ تلك القياساتِ ويمكنُ أيضًا تحديدُ التركيبِ الكيميائيِّ للمصدرِ الضوئيِّ. يوضحُ **الشكلُ 7-19** أحدَ أمثلةِ الأطيافِ الناتجةِ عن مطيافٍ. تُستعملُ التلسكوباتُ على نطاقٍ واسعٍ في علمِ الفضاءِ، لدراسةِ التركيبِ الكيميائيِّ، ودرجةِ حرارةِ النجومِ والغيومِ الغازيَّةِ، والمجرّاتِ.



الشكل 7-19

يمرُّ الضوءُ القادمُ من مصباحٍ زئبقيٍّ خلالَ محزوزِ حيودٍ ليعطيَ الطيفَ الموضَّحَ في الشكلِ.

مثال 7 (ب)

محزوزُ الحيودِ

المسألة

يسقطُ الضوءُ القادمُ من مصدرِ ليزرٍ (هيليوم-نيون) طولُه الموجيُّ $\lambda = 632.8$ nm بشكلٍ عموديٍّ على سطحِ محزوزِ حيودٍ يحتوي على 150 500 خط/m. احسبِ الزوايا التي يمكنُ من خلالِها ملاحظةُ الهدبةِ المضيئةِ الأولى والهدبةِ المضيئةِ الثانيةِ.

الحـــلّ

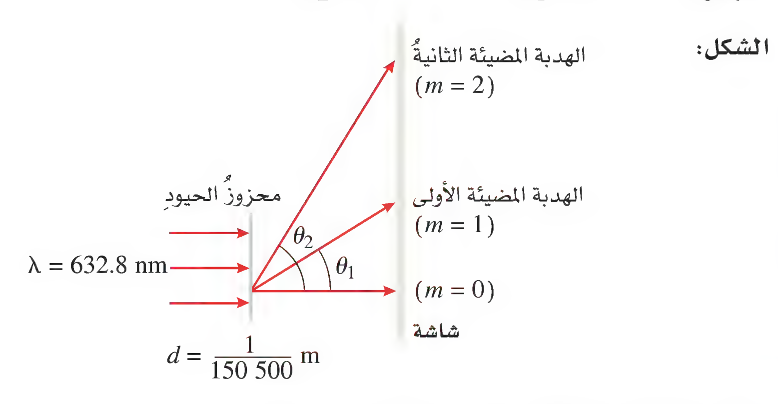
1. أعرِّف

المعطى: $\lambda = 632.8 \text{ nm} = 6.328 \times 10^{-7} \text{ m}$ $\quad m = 1,2$

$$d = \frac{1}{150\,500 \text{ خط}/m} = \frac{1}{150\,500} \text{ m}$$

المجهول: $\theta_1 = ?$ $\quad \theta_2 = ?$

الشكل:



2. أخطِّط

أختارُ معادلةً أو موقفًا: أستعملُ معادلةَ محزوزِ الحيودِ.

$$d \sin \theta = \pm m\lambda$$

أعيدُ ترتيبَ المعادلةِ لعزلِ المجهولِ:

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{m\lambda}{d}\right)$$

3. أحسب

أعوِّضُ القيمَ في المعادلةِ وأحلُّ: الهدبة المضيئة الأولى، $m = 1$:

$$\theta_1 = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{d}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{6.328 \times 10^{-7} \text{ m}}{\frac{1}{150\,500} \text{ m}}\right) = \boxed{5.465°}$$

الهدبة المضيئة الثانية، $m = 2$:

$$\theta_2 = \sin^{-1}\left(\frac{2\lambda}{d}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{2\,(6.328 \times 10^{-7} \text{ m})}{\frac{1}{150\,500} \text{ m}}\right) = \boxed{10.98°}$$

جوابُ الآلةِ الحاسبةِ

بما أن أقلَّ عددٍ للأرقامِ المعنويَّةِ في البياناتِ هو أربعةٌ، فيجبُ تقريبُ الإجابتَيْنِ 5.464926226 و 10.98037754 إلى أربعةِ أرقامٍ معنويَّةٍ فقط.

4. أقيِّم

إن البُعدَ الزاويَّ للهدبةِ المضيئةِ الثانيةِ عن الهدبةِ المضيئةِ المركزيَّةِ أكبرُ قليلاً من ضعفِ بُعدِ الهدبةِ المضيئةِ الأولى عن الهدبةِ المضيئةِ المركزيَّةِ. ليسَ لمحزوزِ الحيودِ هذا قدرةُ تشتيتٍ عاليةٌ. وهو يستطيعُ إيضاحَ الخطوطِ الطيفيَّةِ ذاتِ الهدبةِ المضيئةِ العاشرةِ فقطْ، حيث $(\sin\theta = 0.9524)$.

تطبيق 7 (ب)

محزوزُ الحيودِ

1. استُعملَ محزوزُ حيودٍ فيه 5.000×10^3 خط/cm لدراسةِ طيفِ الصوديوم. جدِ البُعدَ الزاويَّ للخطَّيْن الأصفرَيْن للصوديوم (588.995 nm و 589.592 nm) في كلٍّ من الرتبِ الثلاثِ الأولى.

2. محزوزُ حيودٍ فيه 4525 خط/cm، أضيءَ بأشعَّةِ الشمسِ المباشرةِ، يُنشرُ الطيفُ ذو الرتبةِ الأولى على شاشةٍ بيضاءَ معلَّقةٍ على حائطٍ، في الجهةِ المقابلةِ للمحزوزِ.

أ. على أيِّ زاويةٍ يظهرُ الضوءُ الأزرق ذو الهدبة المضيئة الأولى، إذا كانَ طولُه الموجيُّ 422 nm؟

ب. على أيِّ زاويةٍ يظهرُ الضوءُ الأحمرُ ذو الهدبة المضيئة الأولى إذا كانَ طولُه الموجيُّ 655 nm؟

3. يُضاءُ محزوزٌ فيه 1555 خط/cm بضوءٍ طولُه الموجيُّ 565 nm، ما أقصى رتبةٍ يمكنُ مشاهدتُها باستعمالِ هذا المحزوزِ؟ (ملاحظةٌ: تذكَّرْ أن قيمةَ $\sin\theta$ لا يمكنُ أن تُجاوزَ الواحدَ).

4. يستعملُ طيفٌ زئبقيٌّ طولُه الموجيُّ 546.1 nm في محزوزِ حيودٍ، تُرصدُ الهدبة المضيئة الأولى عند زاويةِ 21.2°، احسُبْ عددَ خطوطِ المحزوزِ في السنتيمترِ الواحدِ.

مراجعةُ القسم 7-2

1. يمرُّ الضوءُ بمحزوزِ حيودٍ فيه 3550 خطّ/cm، ويشكِّلُ هدبة مضيئة أولى عندَ زاوية 12.07°.

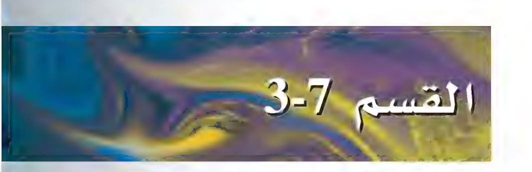
أ. ما الطولُ الموجيُّ للضوءِ المستعمل؟

ب. عندَ أيِّ زاويةٍ تظهرُ الهدبة المضيئة الثانيةُّ؟

2. صفِ التغيُّرَ الطارئَ على عرضِ الهدبة المضيئة المركزيَّةِ، لنموذجِ حيودِ شقٍّ منفردٍ، مع تناقصِ عرضِ الشقِّ.

3. أيٌّ من الأجسامِ التاليةِ يعطي أوضحَ نموذجِ حيودٍ: تفاحةٌ أم رأسُ قلمِ رصاصٍ أم شعرةُ إنسانٍ؟ علِّلْ إجابتَك.

4. هل نموذجا الحيودِ، الناتجانِ عن اللونَيْن البرتقاليِّ والأزرقِ، أحدُهما أعرضُ من الآخرِ؟ وضّحْ ذلك.



الليزر
Laser

الليزرُ والترابط (التشاكه)

تعرَّفنا، إلى الآن، الإشعاعاتِ الكهرومغناطيسيَّةَ الناتجة عن المصادرِ المتوهِّجة، والتي تصدرُ عن المصابيحِ الضوئيَّةِ واللهبِ والشمس. ربَّما شاهدْتَ نوعًا آخرَ من الضوءِ يختلفُ كثيرًا عن الضوءِ الصادرِ عن المصادرِ المتوهِّجة. الضوءُ الناتجُ عن **جهاز الليزر** laser source، مثلاً له خصائصُ فريدةٌ، أدَّتْ إلى استعماله في الكثيرِ من التطبيقات.

ولفهمِ الاختلافِ بين ضوءِ **الليزر** laser والضوءِ العاديِّ، نفترضُ الضوءَ الصادرَ عن مصباحٍ كهربائيٍّ متوهِّج، كما في **الشكل 7-20** (أ). عندما تسيرُ الإلكتروناتُ داخلَ الفتيلة، ينتجُ عنها موجاتٌ كهرومغناطيسيَّةٌ على شكلِ ضوءٍ مرئيٍّ، يختلفُ شكلُ الفتيلةِ وطرائقُ انتقالِ الشحناتِ فيها بينَ نقطةٍ وأخرى داخلَ المصباحِ الضوئي. ونتيجةً لذلك تصدرُ الموجاتُ الكهرومغناطيسيَّةُ في أوقاتٍ مختلفة، ومن مناطقَ مختلفةٍ من الفتيلة. تتباينُ تلك الموجاتُ بالشدَّة، وتنطلقُ في اتِّجاهاتٍ مختلفة، كما يغطّي الضوءُ الناتجُ نطاقًا واسعًا من الطيفِ الكهرومغناطيسيّ، لأنه يشتملُ على أطوالٍ موجيَّةٍ مختلفة. وبالنظرِ إلى وجودِ عددٍ كبيرٍ من الأطوالِ الموجيَّة، وبما أن الضوءَ الناتجَ يتغيَّرُ باستمرار، فإن الضوءَ لا يكونُ متشاكهًا، ويعني ذلك أن مركَّبةَ الموجةِ ليسَ لها طورٌ ثابتٌ في كل الأوقات. وتشبهُ جبهةُ الموجاتِ الضوئيَّةِ غيرِ المتشاكهةِ جبهاتِ موجاتِ الماءِ الناتجةِ عن سقوطِ حبَّاتِ المطرِ فوقَ سطحِ بحيرةٍ. تنتجُ جبهاتُ الموجاتِ عن مسبِّباتٍ مختلفة، لذلك لا ينتجُ عنها نموذجُ تداخلٍ مستديم.

يُطلقُ مصدرُ الليزر، من ناحيةٍ أخرى، حزمةً دقيقةً من الضوءِ المتشاكه كما في **الشكل 7-20** (ب) فتكونُ الموجاتُ الناتجةُ عن مصدرِ ليزرٍ متَّفقةَ الأطوار، وتبقى هكذا مع مرورِ الوقت. وبما أنها متَّفقةُ الأطوار، فإن الموجاتِ تتداخلُ بشكلٍ بنّاءٍ عندَ كلِّ النقاط، وتبدو الموجةُ المحصِّلةُ كموجةٍ منفردةٍ ذاتِ سعةٍ عاليةٍ جدًّا، كما أن الضوءَ الناتجَ عن الليزرِ أحاديُّ اللون، وكلُّ الموجاتِ لها الطولُ الموجيُّ نفسُه. نتيجةً لتلك الخصائصِ يمكنُ جعلُ سعةِ الإضاءةِ وشدَّتِها لضوءِ الليزرِ أكبرَ كثيرًا ممّا هما للضوءِ العاديِّ غيرِ المتشاكه. تُعدُّ سعةُ الموجةِ الضوئيَّةِ مقياسًا للطاقةِ التي تنتقلُ في وحدةِ الزمن، على مساحةٍ معيَّنة.

جهازُ الليزرِ يحوِّلُ الطاقةَ إلى ضوءٍ متشاكه

جهاز الليزرُ يحوِّلُ الضوءَ أو الطاقةَ الكهربائيَّةَ أو الكيميائيَّةَ إلى ضوءٍ متشاكه. هناك أنواعٌ متعدِّدةٌ من مصادرِ الليزر، ولكنْ لها بعضُ الملامحِ المشتركة. لكلِّ تلك المصادرِ موادُّ تُسمّى الوسطَ الفعَّالَ، الذي تضافُ إليه الطاقةُ لينتجَ ضوءًا متشاكهًا. وقد يكونُ هذا الوسطُ الفعَّالُ صلبًا أو

7-3 أهدافُ القسم

- يصفُ خصائصَ ضوءِ الليزر.
- يبيِّنُ أفضليَّةَ ضوءِ الليزرِ في بعضِ التطبيقات.

جهاز الليزر

جهازٌ يصدرُ ضوءًا متشاكهًا له طولٌ موجي واحد.

الليزر

تضخيم الضوء بالانبعاثِ المحفّز للإشعاع.

هل تعلم؟

يتعرَّضُ الضوءُ الناتجُ عن مصباحٍ كهربائيٍّ عاديٍّ لمئةِ مليونِ تغيُّرٍ عشوائيٍّ كلَّ ثانية.





الشكل 7-20

(أ) الموجاتُ الصادرةُ عن مصدرٍ ضوئيٍّ غيرِ متشاكهٍ يتغيَّرُ طورُها باستمرار. (ب) أما الموجاتُ الناتجةُ عن مصدرٍ متشاكه فتكونُ أطوارُها النسبيَّةُ ثابتةً.

سائلاً أو غازًا. ويُحدِّدُ تركيبُهُ الطولَ الموجيَّ للضوءِ الناتجِ عن الليزرِ.

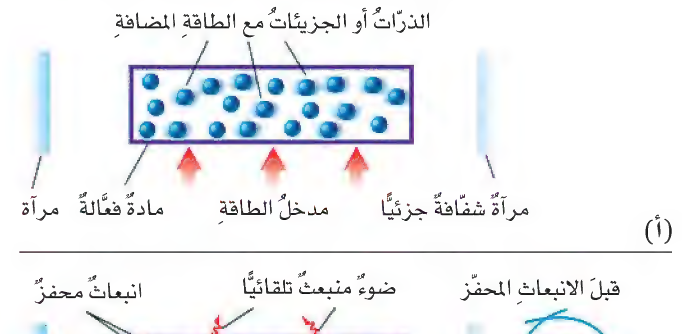
يوضحُ **الشكلُ 7-21** طريقةَ العملِ الأساسيَّةِ لليزرِ، فعندَما يسقطُ ضوءٌ ذو طاقةٍ عاليةٍ أو طاقةٍ كهربائيَّةٍ أو كيميائيَّةٍ، على الوسطِ الفعّالِ الموجودِ داخلَ أنبوبةٍ زجاجيَّةٍ كما في **الشكل 7-21** (أ)، تمتصُّ ذرّاتُ الوسطِ الفعَّالِ بعضَ تلك الطاقةِ. وستعرفُ، في فصلِ الفيزياءِ الذريَّةِ لاحقًا، أن للذرّاتِ مستوياتِ طاقةٍ مختلفةً. عندَما تُعطى الذرَّةُ المستقرّةُ طاقةً، تصبحُ الذرَّةُ محفّزةً، أي تنتقلُ إلى مستوى طاقةٍ أعلى.

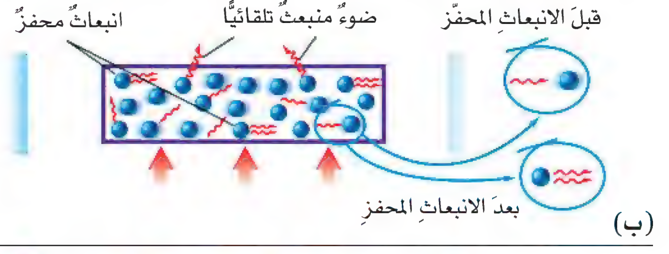
وعندَما يسقطُ ضوءٌ ذو طولٍ موجيٍّ معيَّنٍ على ذرّاتٍ محفّزةٍ، تُحَثُّ الذرّاتُ لتُنتجَ موجاتٍ ضوئيَّةً لها الخصائصُ نفسُها. وعندَما تتخلّى إحدى الذرّاتِ عن طاقتِها تلقائيًّا على شكلِ موجاتٍ ضوئيَّةٍ، تستطيعُ الموجةُ الابتدائيَّةُ هذه أن تُساعدَ الذرّاتِ الأخرى ذاتَ الطاقةِ العاليةِ على التخلّي عن طاقاتِها الإضافيَّةِ، على شكلِ موجاتٍ لها ما للموجةِ الابتدائيَّةِ من طولٍ موجيٍّ وطورٍ واتِّجاهِ انتقالٍ، كما في **الشكل 7-21** (ب). وتُسمّى هذه العمليةُ *الانبعاثَ المحفّز*.

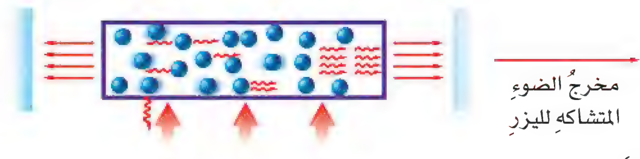
يتسرَّبُ معظمُ الضوءِ الناتجِ عن الانبعاثِ المحفّزِ من خلالِ جوانبِ الأنبوبةِ الزجاجيَّةِ، إلا أن بعضَ هذا الضوءِ يسيرُ على امتدادِ الأنبوبةِ، منتجًا انبعاثًا أكثرَ مع انتقالِه. وتعكسُ مرآتانِ عند طرفَيِ الأنبوبةِ موجات الأشعَّة المتشاكهة إلى داخل الوسطِ الفعَّالِ، حيث تقومُ بتحفيزِ موجاتٍ ضوئيَّةٍ متشاكهةٍ أكثرَ، كما هو موضَّحٌ في **الشكل 7-21** (ج). ومع انتقالِ الضوءِ ذهابًا وإيابًا داخلَ الوسطِ الفعَّالِ، تزدادُ شدَّتُهُ أكثرَ فأكثرَ، وتكونُ إحدى المرآتَيْن شفَّافةً جزئيًّا، مما يسمحُ بانطلاقِ الضوءِ المتشاكه الشديدِ من الليزرِ.

هل تعلم؟

تمثِّلُ كلمةُ ليزرٍ (laser) الأحرفَ الأولى لعدَّةِ كلماتٍ باللغةِ الإنكليزيَّةِ «Light amplification by stimulated emission of radiation» ومعناها: تضخيمُ الضوءِ بطريقةِ الانبعاثِ المحفزِ للإشعاعاتِ.







الشكل 7-21
(أ) تمتصُّ الذرّاتُ أو الجزيئاتُ في وسطٍ فعَّالٍ الطاقةَ من مصدرٍ خارجيٍّ.
(ب) عندما يتفاعلُ الضوءُ المنبعثُ تلقائيًّا مع ذرّةِ المادةِ، تنتجُ الذرَّةُ موجةً ضوئيَّةً أخرى مطابقةً.
(ج) يزيدُ الانبعاثُ المحفّزُ كمِّيّةَ الضوءِ المتشاكهِ في الوسطِ الفعَّالِ، وتتصرَّفُ الموجاتُ المتشاكهةُ كموجةٍ منفردةٍ.

تطبيقاتُ الليزرِ

هناكَ أنواعٌ متعدِّدةٌ وكثيرةٌ من الليزرِ، تتراوحُ أطوالُها الموجيَّةُ من أقصى الأشعَّةِ تحت الحمراءِ إلى أشعَّةِ X من الطيفِ الكهرومغناطيسيِّ. كما اخترعَ العلماءُ جهازَ الميزرِ (maser) الشبيهِ بالليزرِ، والذي يعملُ في نطاقِ الموجاتِ الدقيقةِ من الطيفِ. يستعملُ الليزرُ في مجالاتٍ متعدِّدةٍ، بدءًا من الاستعمالاتِ المنزليَّةِ إلى التطبيقاتِ الصناعيَّةِ، وفي بعضِ المجالاتِ الطبيَّةِ التخصُّصيَّةِ.

قياسُ المسافاتِ بدقَّةٍ متناهيةٍ باستعمالِ الليزرِ

من خصائصِ الليزرِ المهمَّةِ أن حزمةَ أشعَّتِه ضيِّقةٌ جدًّا. وبخلافِ ضوءِ المصباحِ العاديِّ، أو حتّى الضوءِ المركَّزِ بوساطةِ عاكسِ القطعِ المكافئِ، يكونُ انفراجُ حزمةِ ضوءِ الليزرِ قليلاً جدًّا حين يقطعُ مسافاتٍ طويلةً. ومن أسبابِ ذلك أن كلَّ موجاتِ الليزرِ تنتشرُ في اتجاهٍ واحدٍ؛ لذلك يمكنُ استعمالُ ضوءِ الليزرِ لقياسِ مسافاتٍ طويلةٍ، حيثُ يمكنُ توجيهُه إلى سطوحٍ عاكسةٍ بعيدةٍ جدًّا، ثم التقاطُ الضوءِ المنعكسِ منها.

يوضحُ **الشكلُ 7-22**، كيف يوجِّهُ علماءُ الفلكِ ضوءَ الليزرِ باتِّجاهِ نقاطٍ محدَّدةٍ على سطحِ القمرِ، لتحديدِ المسافةِ بينَ الأرضِ والقمرِ. تُرسَلُ ومضةٌ ضوئيَّةٌ باتِّجاهِ واحدٍ من السطوحِ العاكسةِ التي تبلغُ مساحةُ كلٍّ منها $0.25\ m^2$ والتي ثبَّتَها على سطحِ القمرِ روّادُ فضاءِ رحلةِ أبّولو. وتمكَّنَ العلماءُ، بمعرفةِ سرعةِ الضوءِ وقياسِ الزمنِ اللازمِ للومضةِ لتصلَ إلى القمرِ وتعودَ إلى الأرضِ، من قياسِ المسافةِ بين الأرضِ والقمرِ، وقد بلغَتْ $3.84 \times 10^5\ km$. ويُجري علماءُ الجيولوجيا قياساتٍ متكرِّرةً لتسجيلِ التغيُّراتِ الطارئةِ على ارتفاعاتِ القشرةِ الأرضيَّةِ، نتيجةً للعملياتِ الجيولوجيَّةِ. ويمكن استعمالُ الليزرِ في هذه القياساتِ حتى وإن لم يتعدَّ التغيُّرُ في الارتفاعِ سنتيمتراتٍ قليلةً.



الشكل 7-22
يُطلَقُ ضوءُ الليزرِ باتِّجاهِ سطحٍ عاكسٍ على سطحِ القمرِ الذي يبعدُ عن الأرضِ حوالي 380 000 km.

تطبيقاتُ الليزرِ في الطبِّ

يستعملُ الليزرُ في الكثيرِ من التطبيقاتِ الطبيَّةِ، وذلك بالاستفادةِ من كونِ أنسجةٍ معيَّنةٍ من الجسمِ تمتصُّ أطوالاً موجيَّةً مختلفةً من ضوءِ الليزرِ. يمكن، مثلاً، استعمالُ الليزرِ لإزالةِ الآثارِ الجلديَّةِ أو التقليلِ من شدَّتِها. ولإزالةِ أنواعٍ من إشاراتِ الولادةِ، دونَ التأثيرِ في الأنسجةِ المحيطةِ بها. تتأثَّرُ الأنسجةُ ذاتُ الأثرِ الجلديِّ بالطولِ الموجيِّ للضوءِ المستعملِ في الليزرِ. بينَما تكونُ باقي الأنسجةِ محميَّةً.

الكثيرُ من التطبيقاتِ الطبيَّةِ تستفيدُ من تبخُّرِ الماءِ بوساطةِ أشعَّةِ الليزرِ تحتَ الحمراءِ والشديدةِ الضوءِ، والناتجةِ عن جهازِ ليزرِ ثنائي أكسيدِ الكربونِ والتي لها طولٌ موجيٌّ $10\ \mu m$. يمكنُ لليزرِ ثنائي أكسيدِ الكربونِ أن يخرقَ عضلاتِ الأنسجةِ، وذلك بتسخينِ الماءِ الموجودِ في الخلايا وتبخيرِه. كما أن إحدى إيجابيّاتِ الليزرِ قدرةُ الطاقةِ الناتجةِ عنه على تجليطِ الدمِ في الأوعيةِ الدمويَّةِ المستحدثةِ، ممّا يقلِّلُ من نزفِ الدمِ، ومن الإصابةِ بالالتهاباتِ. كما يمكنُ لشعاعِ الليزرِ أن يُحبَسَ في المنظارِ (الأندوسكوب)، لدى إدخالِه من فتحةٍ إلى داخلِ الجسمِ. يستطيعُ الجرّاحونَ بالنتيجةِ أن يوقفوا أيَّ نزفٍ داخليٍّ، أو يزيلوا الأورامَ السرطانيَّةَ، دونِ القيامِ بعملياتٍ جراحيَّةٍ ضخمةٍ.

يمكنُ لليزرِ أيضًا معالجةُ الأنسجةِ التي يصعُبُ علاجُها بالعمليَّاتِ الجراحيَّةِ التقليديَّةِ. مثلاً، يمكنُ لبعضِ الأطوالِ الموجيَّةِ المحدَّدةِ لليزرِ أن تخترقَ مناطقَ في مقدِّمةِ العينِ (القرنيَّةِ-العدسة) دونَ إتلافِها. لذلك يُستعملُ الليزرُ بشكلٍ فعّالٍ في معالجةِ شبكيَّةِ العينِ، وفي إجراءِ عملياتٍ أخرى في العينِ، كعلاجِ زرقِ العينِ، عندَما يصبحُ ضغطُ المائعِ داخلَ العينِ مرتفعًا جدًّا. وزرقُ العينِ قد يؤدّي، ما لم يُعالَجْ، إلى ضررٍ في العصبِ البصريِّ، ومن ثمَّ إلى العمى. كما أن تركيزَ الليزرِ على ممرٍّ مسدودٍ يؤدّي إلى حرقِ نسيجٍ صغيرٍ، فيخفِّفُ الضغطَ والانسدادَ. يستعملُ الليزر أيضًا لتصحيحِ قِصَرِ النظرِ، وذلك بتركيزِ الأشعةِ على المنطقةِ المركزيَّةِ من القرنيَّةِ، كي تصبحَ أكثرَ تسطُّحًا.

هل تعلم؟

المبدأُ المتَّبعُ في قراءةِ المعلوماتِ المخزَّنةِ على قرصٍ مدمَجٍ هو نفسُه المتَّبعُ في قراءةِ رموزِ الأعمدةِ المدوَّنةِ على الكثيرِ من المنتجاتِ الاستهلاكيَّةِ. تسمحُ هذه المنتجاتُ بانعكاسِ ضوءِ الليزرِ من الأعمدةِ والفراغاتِ في رمزِ الأعمدةِ. ينتجُ عن ذلك رمزٌ رقميٌّ يمثِّلُ رقمَ تصنيعِ المنتجِ. تُنقلُ تلك المعلوماتُ إلى حاسوبِ المتجرِ الذي يزوِّدُ المحاسبَ باسمِ المنتجِ وسعرِه.



نافذةٌ على الموضوع

مشغِّلُ القرصِ المُدْمَجِ

شكَّلَ مشغِّلُ الأقراصِ المدْمَجةِ (CD) واحدًا من تطبيقاتِ الليزرِ المهمَّة. ينطلقُ في هذا الجهازِ ضوءٌ من مصدرِ ليزر عبرَ سلسلةٍ من البصريَّاتِ نحوَ قرصٍ مدْمجٍ عليه موسيقى أو بياناتٌ مسجَّلةٌ رقميًّا، حيث يقرأُ مشغِّلُ القرصِ المدمجِ البياناتِ وفقَ انعكاسِ ضوءِ الليزرِ من القرص.

في عمليةِ التسجيلِ الرقميِّ، تتجمَّعُ كلُّ عيِّنةٍ من الأصواتِ في فتراتٍ زمنيَّةٍ محدَّدةٍ. وتتحوَّلُ كل عيِّنةٍ إلى إشارةٍ كهربائيَّةٍ ومن ثَمَّ إلى سلسلةٍ من الأرقامِ الثنائيَّةِ، التي تتألَّفُ من الخانتيْنِ 0 و 1 فقط. تُرمِّزُ الأرقامُ الثنائيَّةُ لتشتملَ على معلوماتٍ حولَ الإشارةِ، كالتردُّدِ والتوافقيَّاتِ

يُوجَّهُ ضوءُ الليزرِ نحوَ سطحِ قُرصٍ مدْمجٍ. تعكسُ المناطقُ المصقولةُ من القرصِ الضوءَ باتِّجاهِ الخليَّةِ الكهروضوئيَّةِ.

الموجودةِ، وعلوِّ صوتِ القناتَيْنِ اليمنى واليسرى، وسرعةِ المحرِّكِ الذي يديرُ القرصَ. وتُسمّى هذه العمليةُ التحويلَ من القياسيِّ إلى الرقميِّ (a-d).

تُخزنُ البياناتُ الثنائيَّةُ الرقميَّةُ على القرصِ المدْمجِ في سلسلةٍ من الحفرِ والمساحاتِ المصقولةِ التي تُسمّى أراضيَ على سطحِ القرصِ.

يبدأُ تسجيلُ الحُفرِ والسطوحِ عندَ مركزِ القرصِ، ثم بشكلٍ لولبيٍّ نحوَ الخارجِ، على مساراتِ القرصِ. يبلغُ عرضُ كلٍّ من تلك المساراتِ 500 nm، ويفصلُ بين المساريْنِ 1600 nm. وإذا سحبْتَ مسارَ البياناتِ على القرصِ إلى الخارجِ، يكونُ طولُ هذا المسارِ حوالي 5 km.

لدى تشغيلِ القرصِ، ينعكسُ ضوءُ الليزرِ من سلسلةِ الحفرِ والسطوحِ تلك إلى الفاحصِ، ويتمُّ اختيارُ عمقِ الحفرةِ، بحيثُ يحدثُ تداخلٌ إتلافيٌّ لدى انتقالِ الليزرِ من حفرةٍ إلى سطحٍ، أو من سطحٍ إلى حفرةٍ. ويسجِّلُ الفاحصُ التغيُّراتِ في انعكاسِ الضوءِ بين الحفرِ والسطوحِ بالرقمِ 1، وفي انعكاسِه عن المناطقِ المصقولةِ بالرقمِ 0. تُقلبُ البياناتُ الثنائيَّةُ لاحقًا إلى إشاراتٍ قياسيَّةٍ، تسمعُها كموسيقى. وتُسمّى هذه الخطوةُ التحويلَ من الثنائيِّ إلى القياسيِّ (d-a). ويمكنُ تضخيمُ الإشارةِ آنذاك وإرسالُها إلى جهازِ السمّاعةِ. ويعملُ جهازُ تشغيلِ قرصِ قراءةِ الذاكرةِ فقط (CD-ROM) في جهازِ الحاسوبِ، بالطريقةِ نفسِها تقريبًا. وبما أن البياناتِ الموجودةَ على الحاسوبِ هي في الأساسِ رقميَّةٌ، فإننا لا نحتاجُ إلى نقلِ a-d أو d-a.

يمكنُ أن تتساءلَ عن التباينِ في طريقةِ عملِ مسجِّلِ الأقراصِ (CD-R).

ليسَ لهذهِ الأقراصِ أيُّ حُفرٍ أو سطوحٍ على الإطلاقِ. وتحتوي بالمقابلِ على طبقةٍ رقيقةٍ وحسّاسةٍ من الصباغِ محصورةٍ بين سطحٍ معدنيٍّ عاكسٍ ومصقولٍ، كالألمنيومِ عادةً، وطبقةٍ بلاستيكيَّةٍ شفّافةٍ.

لمشغِّلِ CD-R ليزرٌ إضافيٌّ قدرتُه حوالي عشرةِ أمثالِ قدرةِ الليزرِ المستعملِ في قراءةِ القرصِ المدْمجِ الذي يكتبُ البياناتِ الرقميَّةَ على مساراتِ قرصِ CD-R. عندَما يشعُّ ليزرُ الكتابةِ على الصباغِ الخفيفِ الحسّاسِ، يتحوَّلُ الصباغُ إلى لونٍ قاتمٍ، ويُنشئُ مناطقَ غيرَ عاكسةٍ على المسارِ، وينتجُ عن هذهِ العمليَّةِ نموذجٌ رقميٌّ يتصرَّفُ كالحفرِ والسطوحِ التي يمكنُ لمشغِّلِ CD أن يقرأَها.

يعملُ مشغِّلُ الأقراصِ الرقميَّةِ المتعدِّدةِ الاستعمالاتِ (DVD) وفقَ المبدأ نفسِه. إلا أن الليزرَ في مشغِّلِ DVD له طولٌ موجيٌّ أقصرُ من الليزرِ المستعملِ في مشغِّلِ CD، حيث يسمحُ الطولُ الموجيُّ القصيرُ لمشغِّلِ DVD بقراءةِ البياناتِ الأكثرِ تقاربًا، مقارنةً مع البياناتِ على CD. كما أن بعضَ أقراصِ DVD عليها طبقتانِ من البياناتِ ويمكنُ كتابتُها على جانبَيِ القرصِ. للجانبِ السفليِّ من قرصِ DVD ذي الجانبَينِ طبقةٌ أرقُّ من مادةِ الصباغِ العاكسِ، تكونُ عادةً من ذهبٍ، وتسمحُ لبعضِ الضوءِ أن يمرَّ خلالَها بحيثُ يُقرأُ الجانبُ العلويُّ للقرصِ.

مراجعةُ القسم 7-3

1. بمَ يختلفُ ضوءُ الليزرِ عن الضوءِ الاعتياديِّ ذي الطولِ الموجيِّ الواحدِ؟

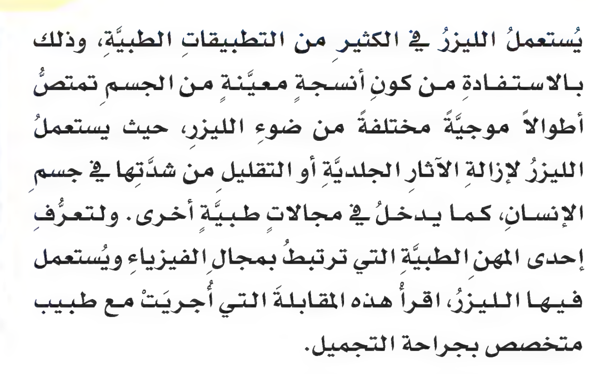
2. تشتملُ عمليةُ الانبعاثِ المحفّزِ على إنتاجِ موجةٍ ثانيةٍ مطابقةٍ للموجةِ الساقطةِ الأولى، هل يتعارضُ الحصولُ على هذه الموجةِ الثانيةِ مع مبدأ حفظِ الطاقةِ؟ علِّلْ إجابتَك.

3. **تفكيرٌ ناقد:** تنقلُ أجهزةُ الأليافِ البصريَّةِ الضوءَ باستعمالِ الانعكاسِ الكلِّيِّ الداخليِّ خلالَ أليافٍ زجاجيَّةٍ رقيقةٍ، يُستعملُ ضوءُ الليزرِ في أجهزةِ الأليافِ البصريَّةِ بدلاً من الضوءِ الأبيضِ لنقلِ الموجاتِ، استعمل معلوماتِكَ حولَ الانكسارِ لإيضاحِ سببِ ذلك.

مِهَنُ الفيزياء

جراحةُ التجميلِ





يُستعملُ الليزرُ في الكثيرِ من التطبيقاتِ الطبيَّةِ، وذلك بالاستفادةِ من كونِ أنسجةٍ معيَّنةٍ من الجسمِ تمتصُّ أطوالاً موجيَّةً مختلفةً من ضوءِ الليزرِ، حيث يستعملُ الليزرُ لإزالةِ الآثارِ الجلديَّةِ أو التقليلِ من شدَّتِها في جسمِ الإنسانِ، كما يدخلُ في مجالاتٍ طبيَّةٍ أخرى. ولتعرُّفِ إحدى المهنِ الطبيَّةِ التي ترتبطُ بمجالِ الفيزياءِ ويُستعمل فيها الليزرُ، اقرأْ هذه المقابلةَ التي أُجريَتْ مع طبيبٍ متخصصٍ بجراحةِ التجميلِ.



ما نوعُ الدراسةِ التي ساعدتْك لتصبحَ جرّاحَ تجميلٍ؟

بعد دراسةِ الطبِّ والتدريبِ الطبيِّ الذي أجريتُه، أستعملُ الكثيرَ من المعلوماتِ الهندسيَّةِ في عملي، كما أن موادَّ الفيزياءِ والرياضيّاتِ مفيدةٌ جدًّا في هذا الإطارِ. ذلك أن معرفةَ الفيزياءِ لها علاقةٌ مباشرةٌ بالجراحةِ، وخصوصًا الجراحةَ التجميليَّةَ، فالكثيرُ من الأدواتِ والمعدَّاتِ المستعملةِ تتبعُ أشكالاً هندسيَّةً تحتاجُ إلى معلوماتٍ من الرياضيّاتِ والفيزياءِ. ومن المهمِّ التخطيطُ جيدًّا قبلَ إجراءِ أيةِ عمليةٍ جراحيَّةٍ، وإجراءُ الرسومِ والأشكالِ التي على الجرَّاحِ أن ينفِّذَها في أثناءِ إجراءِ الجراحةِ.

ما الذي ساعدَك على اختيارِ مهنتِك؟

إن المعلوماتِ التي تعلَّمناها في المرحلةِ الثانويَّةِ هي الأساسُ. وكلما كانَ هذا الأساسُ قويًّا كانَ أسهلَ لنا أن نختارَ وننجحَ في اختيارِنا. فنحنُ على اتصالٍ دائمٍ ويوميٍّ بالفيزياءِ من خلالِ الأجهزةِ والمعدّاتِ الطبِّيةِ، والكيمياءِ في الأدويةِ، والرياضياتِ في مقاييسِ الأدويةِ والتخطيطِ والحسابِ المدروسِ، ومادةِ الأحياءِ في معرفةِ وظائفِ الجسمِ وأنسجتِها.

ما الذي جعلَكَ تهتمُّ بجراحةِ التجميلِ؟

إن اهتمامي بالجراحةِ بدأ مباشرةً بعد التدريبِ الطبّيِّ، ذلك أن الجراحةَ هي الحلُّ الأسرعُ، وأحيانًا الوحيدُ لإزالةِ المرضِ. فعندَما يشكو المريضُ من وجعِ البطنِ، ويتمُّ علاجُه بجراحةٍ بسيطةٍ، قد يؤدّي ذلك إلى إنقاذِ حياتِه، وهذا ما جعلني أتَّجهُ إلى الجراحةِ. وجراحةُ التجميلِ هي أحدُ فروعِ الجراحةِ، وهي ليسَتْ تجميليَّةً فقط، بل تكميليَّةً أيضًا، حيث يتمُّ فيها علاجُ الحروقِ والتشوُّهاتِ، والإصاباتِ والأورامِ الخبيثةِ.

ما طبيعةُ عملِك؟

جراحةُ التجميلِ لها فروعٌ كثيرةٌ. فمنها الجراحةُ التجميليَّةُ التي يتمُّ فيها تصحيحُ العيوبِ التي يشتكي منها المريضُ، وتحسينُ المظهرِ. وهي في تطوُّرٍ مستمرٍّ، ومن أهمِّ الأمورِ التي يُستعملُ فيها جهازُ الليزرِ. وقد زادَتِ استعمالاتُ الليزرِ في الفترةِ الأخيرةِ. فمثلاً يُستعملُ لإزالةِ الآثارِ والتصبغاتِ الجلديَّةِ، والتجاعيدِ الخفيفةِ، ولتحسينِ البشرةِ، وإزالةِ الوحماتِ والأوعيةِ الدمويَّةِ الخفيفةِ، وإزالةِ الشعرِ غيرِ المرغوبِ فيه.

أما الفرعُ الآخرُ من جراحةِ التجميلِ، فهو الجراحةُ التكميليَّةُ، حيث يتمُّ فيها إنقاذُ حياةِ المريضِ، وتحسينُ معيشتِه، مثلُ علاجِ التشوُّهاتِ الخلقيَّةِ والإصاباتِ والحوادثِ والحروقِ. والجديدُ فيها الزراعةُ المجهريَّةُ، كزراعةِ اليدِ، أو أجزاءٍ من الجسمِ، كالوجهِ، حيث يتمُّ أخذُ العضوِ من شخصٍ ميِّتٍ دماغيًّا، وزراعتُه في شخصٍ سليمٍ.

ما الذي تفضِّلُهُ في عملِك؟ وما الذي تودُّ أن تغيِّرَه؟

جراحةُ التجميلِ جراحةٌ تحدٍّ. وهي متداخلةٌ مع تخصُّصاتٍ كثيرةٍ حيثُ تتمُّ استشارةُ جرّاحِ التجميلِ في كثيرٍ من العمليّاتِ التي يُصادفُ فيها الأطباءُ بعضَ المشكلاتِ. والذي أودُّ أن يتغيَّرَ هو مفهومُ الناسِ لجراحةِ التجميلِ، حيث يفكِّرُ الناسُ في الجانبِ التجميليِّ، ويتناسون الجانبَ الأهمَّ، وهو الجراحةُ التقويميَّةُ، أساسُ جراحةِ التجميلِ.



ما علاقةُ طبيعةِ عملِك بالفيزياءِ؟

العلاقةُ وطيدةٌ بينَهما، فالكثيرُ من الأجهزةِ المستعملة، لها علاقةٌ بالفيزياءِ، كالليزرِ واستعمالاته، حيث نقومُ برسمِ أشكالٍ هندسيةٍ نتَّبعُها في أثناءِ الجراحةِ، مثل (z-plasty)، وذلك كي تتمَّ الجراحةُ بالشكلِ الأمثلِ والصحيحِ.

ما النصيحةُ التي تقدِّمُها إلى كلِّ من يريدُ أن يتخصَّصَ في جراحةِ التجميلِ؟

أهمُّ نصيحةٍ هي الأساسُ الصحيحُ. فعندَما يكونُ الأساسُ جيدًّا، فإن ذلك يُساعدُ على التفوُّقِ في الأداءِ مستقبلاً. فالإنسانُ لا يولدُ عالمًا، لكن بالاجتهادِ والدراسةِ والمثابرةِ يستطيعُ التوصُّلَ إلى هدفِه والتميُّزُ فيه.

ملخّصُ الفصل 7

أفكارٌ أساسيَّة

القسم 7-1 التداخل

- تتداخلُ الموجاتُ الضوئيَّةُ ذاتُ الطولِ الموجيِّ نفسِه، والتي لها فروقُ طورٍ ثابتةٌ، لتنتجَ نماذجَ تداخلٍ مضيئةً ومظلمةً.
- في تداخلِ الشقِّ المزدوجِ، يتطلَّبُ موقعُ الهدبةِ المضيئةِ أن يكونَ فرقُ المسارِ بين الموجتَيْن المتداخلتَيْن مساويًا لعددٍ صحيحٍ من الأطوالِ الموجيَّةِ.
- في تداخلِ الشقِّ المزدوجِ، يتطلَّبُ موقعُ الهدبةِ المظلمةِ أن يكونَ فرقُ المسارِ بين الموجتَيْن المتداخلتَيْن مساويًا لعددٍ فرديٍّ من نصفِ الطولِ الموجيِ.

القسم 7-2 الحيود

- تكوِّنُ الموجاتُ الضوئيَّةُ نموذجَ حيودٍ عندَما تمرُّ حولَ عائقٍ، أو من شقٍّ، وتتداخلُ فيما بينَها.
- يعتمدُ موقعُ هدبة مضيئة في النموذجِ الناتجِ عن محزوزِ حيودٍ على التباعدِ بين شقوقِ المحزوزِ، ورتبةِ الهدبة المضيئة، والطولِ الموجيِّ للضوءِ.

القسم 7-3 الليزر

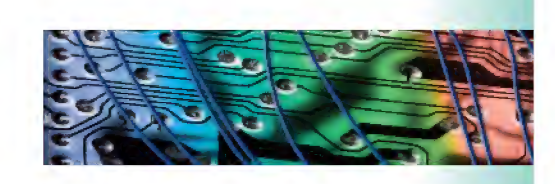
- جهازُ الليزرِ يحوِّلُ الطاقةَ إلى حزمةٍ من الضوءِ المتشاكهِ الأحاديِّ اللونِ.

مصطلحاتٌ أساسيَّة

- **الترابط (التشاكه)** Coherence (ص 199)
- **فرقُ المسارِ** Path difference (ص 201)
- **رقمُ الرتبةِ** Order number (ص 201)
- **الحيود** Diffraction (ص 204)
- **جهاز الليزر** Laser source (ص 211)
- **الليزر** Laser (ص 211)

رموزُ المتغيِّراتُ

الكمّية	الرمز	الوحدة
الطولُ الموجيُّ	λ	m متر
الزاويةُ بينَ النقطة ومركزِ نموذجِ التداخلِ	θ	° درجة
البُعدُ بين الشقَّيْن	d	m متر
رقمُ الرتبةِ	m	بلا وحدات



مراجعةُ الفصل 7

راجعْ وقيِّمْ

التداخل

أسئلةُ مراجعة

1. ماذا يحدثُ إذا تداخلَتْ موجتان لهما السعةُ نفسُها تداخلاً بنّاءً؟ ماذا يحدثُ إذا تداخلتا بشكل إتلافيٍّ؟

2. يُرصدُ تداخلُ الصوتِ من خلالِ التفاوتِ في سعتِه. كيف يُرصدُ تداخلُ الضوءِ؟

3. أُجريَتْ تجربةُ تداخلِ الشقِّ المزدوجِ باللونِ الأحمرِ، ثم باللونِ الأزرقِ. بمَ يختلفُ نموذجا التداخلِ في الحالتَين؟ (ملاحظة: خذْ في الحسبانِ الفرقَ في الطولِ الموجيِّ بين اللونَين الضوئيَّين.)

4. ما البياناتُ التي ينبغي أن تجمَعها لتحسبَ بشكلٍ صحيحٍ الطولَ الموجيَّ للضوءِ، في تجربةِ تداخلِ الشقِّ المزدوجِ؟

أسئلةُ حولَ المفاهيم

5. إذا أُجريَتْ تجربةُ الشقِّ المزدوجِ تحتَ الماءِ، فكيف يتأثَّرُ نموذجُ التداخلِ؟ (ملاحظة: ادرسْ تغيُّراتِ الضوءِ في وسطٍ ذي مُعاملِ انكسارٍ أعلى.)

6. نتيجةً لبُعدِ النجومِ الشاسعِ عنّا، تبدو لنا مصادرَ نقطيَّةً للضوءِ. إذا بدَت نجمتانِ متقاربتَين في السماءِ، فهل يُنتِجُ الضوءُ القادمُ منهما نموذجَ تداخلٍ مستديمٍ؟ علِّلْ إجابتك.

7. افترضْ أن الضوءَ الأبيضَ ناتجٌ عن مصدرٍ منفردٍ في تجربةِ الشقِّ المزدوجِ. صفْ نموذجَ التداخلِ، إذا جرَت تغطيةُ أحدِ الشقَّيْن بمرشِّحٍ أحمرَ، والآخرِ بمرشِّحٍ أزرقَ.

8. تمَّ الحصولُ على نموذجِ تداخلٍ باستعمالِ الضوءِ الأخضرِ في جهازٍ يمكنُ تغييرُ المسافةِ فيه بينَ الشقَّيْن. إذا ازدادَتِ المسافةُ بينَ الشقَّيْن، فهل تزدادُ المسافةُ بينَ الأهدابِ المضيئةِ في النموذجِ أم تنقصُ أم تبقى ثابتةً؟ علّلْ إجابتك.

مسائلُ تطبيقيَّة

9. يسقطُ ضوءٌ على شقَّيْن تفصلُ بينَهما مسافةُ 0.33 mm، إذا كانَتِ الزاويةُ بينَ الهدبةِ المظلمةِ الأولى والهدبةِ المضيئةِ المركزيَّة $0.055°$، فما الطولُ الموجيُّ للضوءِ؟

10. يُصدرُ أحدُ مصابيحِ غازِ الصوديوم في الشارعِ ضوءًا شبهَ أحاديِّ اللونِ. إذا سقطَ هذا الضوءُ على بابٍ خشبيٍّ فيه شقّانِ مستقيمانِ ومتوازيان، فإن نموذجَ تداخلٍ يظهرُ على حائطٍ خلفَ البابِ. البُعدُ بينَ الشقَّيْن 0.3096 mm، والهدبة المضيئة الثانيةُ تقعُ على زاويةِ $0.218°$ من الهدبة المضيئة المركزيَّة. احسبْ:
    أ. الطولَ الموجيَّ للضوءِ.
    ب. زاويةَ الهدبةِ المضيئة الثالثة.
    ج. زاويةَ الهدبةِ المضيئة الرابعة.

الحيود

أسئلةُ مراجعة

11. لماذا ينتجُ الضوءُ نموذجًا مشابهًا لنموذجِ التداخلِ عند دخولِه في شقٍّ منفردٍ؟

12. كيف يتغيَّرُ عرضُ الهدبةِ المضيئةِ المركزيَّةِ في نموذجِ حيودِ الشقِّ المنفردِ، إذا ازدادَ الطولُ الموجيُّ للضوءِ؟

13. لماذا ينفصلُ الضوءُ الأبيضُ إلى طيفٍ من الألوانِ، لدى دخولِه في محزوزِ حيودٍ؟

أسئلةُ حولَ المفاهيم

14. يشعُّ ضوءٌ أحاديُّ اللونِ من خلالِ محزوزَيْ حيودٍ. ينتجُ محزوزُ الحيودِ الثاني نموذجًا تكونُ فيه الهدبة المضيئة الثانيةُ أبعدَ عن الهدبة المضيئة المركزيَّة. استعملْ ذلك لتتحقَّق إن كانَ هناك عددٌ أكبرُ أو أقلُّ من الخطوطِ في السنتيمترِ في المحزوزِ الثاني، مقارنةً مع المحزوزِ الأوَّل.

مسائلُ تطبيقية

15. يدخلُ ضوءٌ طولهُ الموجيُّ 353 nm من خلالِ محزوزِ حيودٍ فيه 795 خطّ/cm، احسبْ زاويةَ رصدِ الهدبة المضيئة الثانيةِ.

16. يمكنُنا رصدُ ألوانِ طيفِ النجومِ، ودراسةِ تركيبِها الكيميائيِّ، بوصلِ مرقابِ محزوزِ الحيودِ بتلسكوبٍ فلكيٍّ، افترضْ أن المحزوزَ فيه 3661 خط/cm.

أ. إذا كانتِ الأطوالُ الموجيَّةُ لضوءِ النجمِ هي 478.5 nm، 647.4 nm و 696.4 nm، فما الزاويةُ التي يُرصدُ عندَها الخطُّ الطيفيُّ الأوّلُ؟

ب. ما زاويةُ رصدِ تلك الخطوطِ في الطيفِ ذي الرتبةِ الثانيةِ؟

الليزر

أسئلةُ مراجعة

17. ما الخصائصُ التي تتوفَّرُ في ضوءِ الليزرِ ويفتقدُها الضوءُ الاعتياديُّ المستعملُ في منزلِك؟

18. يُستعمل ضوءُ الليزرِ على نطاقٍ واسعٍ، لتحقيقِ تداخلِ الشقِّ المزدوجِ، أوضحْ لماذا يفضَّلُ ضوءُ الليزرِ على الضوءِ الاعتياديِّ لرصدِ التداخلِ.

19. أعطِ مثالَيْن يستوجبان الاتِّجاهَ الثابتَ لانتقالِ ضوءِ الليزرِ. ثم أعطِ مثالَيْن يستوجبان ضوءَ ليزرٍ عاليَ الشدَّةِ.

مراجعةٌ عامَّة

20. يُقاسُ الخطُّ المضيءُ ذو الطولِ الموجيِّ 546.1 nm للزئبق عندَ زاويةِ 81.0° في الرتبةِ الثالثةِ من نموذجِ محزوزِ حيودٍ، احسبْ عددَ الخطوطِ في السنتيمترِ الواحدِ للمحزوزِ.

21. أُجريَتْ تجربةُ تداخلِ الشقِّ المزدوجِ باستعمالِ ضوءٍ أزرقَ، لأنبوبةِ هيدروجينٍ ($\lambda = 486$ nm)، تقعُ الهدبة المضيئة الخامسةُ على زاويةِ 0.578° من الهدبة المضيئة المركزيَّةِ، فما المسافةُ بينَ الشقَّيْن؟

22. تدخلُ حزمةٌ ضوئيَّةٌ، تشتملُ على طولَيْن موجيَّيْن λ_1 و λ_2، في مجموعةٍ من الشقوقِ المتوازيةِ. في نموذجِ التداخلِ، يقعُ الخطُّ الرابعُ المضيءُ للطولِ الموجيِّ λ_1 والخطُّ الخامسُ المضيءُ للطولِ الموجيِّ λ_2، في الموقعِ نفسِه، فإذا كانَتْ $\lambda_1 = 540.0$ nm، فما قيمةُ λ_2؟

23. يتراوحُ الطولُ الموجيُّ للضوءِ الصادرِ عن مصباحٍ متوهّجٍ بينَ 400.0 nm و 700.0 nm. عندَ تركيزِ هذا الضوءِ على محزوزِ حيودٍ نستطيعُ رؤيةَ الطيفِ ذي الرتبةِ الأولى بالكاملِ، ولكن لا نرى شيئًا من طيفِ الرتبةِ الثانيةِ، فما المسافةُ القصوى بين خطوطِ المحزوزِ؟

24. في تجربةٍ لتداخلِ الشقِّ المزدوجِ لدينا القيمُ التاليةُ: $\lambda = 643$ nm، $\theta = 0.737^\circ$، $d = 0.150$ mm. فما فرقُ المسارِ بالمليمتراتِ وبالأطوالِ الموجيَّةِ للضوءِ الصادرِ عن الشقَّيْن عند الزاويةِ المذكورةِ؟ وهل نحصلُ عندَ هذه النقطةِ على هدبةٍ مضيئةٍ أم هدبةٍ مظلمةٍ أم منطقةٍ بينَهما؟

التقارير والمشاريع

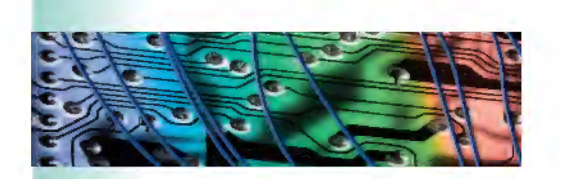
.1 صمِّمْ نموذجًا مشابهًا لنموذجِ التداخلِ. استعمل الحاسوبَ لرسمِ عدَّةِ دوائرَ متَّحدةِ المركزِ وتفصلُ بينَها مسافاتٌ متساويةٌ. لتمثيلِ موجاتٍ منتشرةٍ من مصدرٍ معيَّن، صَوِّرِ الصفحةَ فوتوغرافيًّا على شفافتَيْن (سلوفان) وضعْهما على جهازِ إسقاطٍ علويٍّ، ثم غيِّرِ المسافةَ بين «نقطتَي المصدرِ» ولاحظْ تأثيرَ ذلك في نموذجِ التداخلِ. صمِّمْ شفافاتٍ بخطوطٍ أسمكَ ومسافاتٍ أبعدَ، لاكتشافِ تأثيرِ الطولِ الموجيِّ في التداخلِ.

.2 ادرسْ تأثيرَ البُعدِ بينَ الشقَّيْنِ في نموذجِ التداخلِ. أحكمْ تغطيةَ ضوءٍ كشّافٍ بورقةِ ألمنيوم، واجعلْ فيها ثقوبًا. لاحظْ أولاً النموذجَ الذي تراهُ على شاشةٍ تقعُ على بُعد حوالي 20 cm، نتيجةً لثقبٍ واحدٍ، ثمَّ لاحظِ النموذجَ الناتجَ عن ثقبَيْن. كيف تؤثِّرُ المسافةُ بين الثقبَيْنِ في المسافةِ بين الأهدابِ المضيئةِ في النموذجِ؟ ارسمْ رسومًا تخطيطيَّةً لمشاهداتِك، وقارنْ بينَها وبينَ نتائجِ تجربةِ الشقِّ المزدوجِ، كيف يمكنُك تطويرُ جهازِك؟

.3 تُظهرُ فقّاعةُ الصابونِ ألوانًا مختلفةً لتداخلِ اللونِ المنعكسِ من سطحِها الخارجيِّ مع الضوءِ المنكسرِ إلى داخلِها والمنعكسِ من سطحِها الداخليِّ. معاملُ الانكسارِ n = 1.35 وسمكُ الفقّاعةِ يتراوحُ بينَ 600 nm و 1000 nm. هل باستطاعتِك التنبُّؤَ بألوانِ الفقّاعةِ؟ تحقَّق من إجابتِك بالحصولِ على فقاقيعِ صابونٍ، وملاحظةِ ترتيبِ الألوانِ الصادرةِ عنها. هل باستطاعتِك معرفةَ سمكِ الفقّاعةِ بملاحظةِ ألوانِها؟ رتِّبْ نتائجَك في جدولٍ أو قمْ ببرنامجٍ حاسوبٍ للتنبُّؤِ بسمْكِ فقّاعةِ الصابون، بناءً على الطولِ الموجيِّ للضوءِ المنعكسِ عنها.

.4 قدَّمَتْ تجربةُ توماس يونغ عامَ 1803 دليلاً حاسمًا على الطبيعةِ الموجيَّةِ للضوءِ، إلا أنّها تعرَّضَتْ لانتقاداتٍ شديدةٍ في إنكلترا، إلى أن قامَ أوغوستين فرنييل بتقديمِ نظريَّتِه الموجيَّةِ للضوءِ إلى الأكاديميَّةِ الفرنسيَّةِ للعلومِ عامَ 1819. قمْ ببحثَيْنِ حولَ حياةِ كلٍّ من هذَيْن العالِمَيْن وعملِه. قدِّمْ أحدَهما على شكلِ تقريرٍ أو ملصقٍ أو فيديو أو حاسوبٍ.

.5 قمْ ببحثٍ حولَ الموجاتِ من حولِنا، بما فيها الموجاتُ الموجودةُ في التطبيقاتِ التجاريَّةِ والطبيَّةِ والصناعيَّةِ. أوضحْ كيفَ تساهمُ خصائصُ الموجاتِ في أهمِّيتِها وتطبيقاتِها. ابحثْ مثلاً عن أنواعِ الموجاتِ المستعملةِ في التطبيقاتِ الطبيَّةِ، كتصويرِ الرنينِ المغناطيسيِّ MRI وفوقَ الصوتيّاتِ (السونار). حدِّدْ أطوالَها الموجيَّةَ. ثم ابحثْ عن استعمالاتِ الليزرِ في الطبِّ وفي الصناعةِ. حضِّر جداولَك التي تصفُ نتائجَك وقدِّمْها إلى زملائِك في الصفِّ.



تقويم الفصل 7

اختيارٌ من متعدِّد

1. ماذا يمثِّلُ التعبيرُ d في معادلةِ التداخلِ؟
- أ. المسافةُ من نقطةِ الوسطِ بينَ الشقَّيْنِ والشاشةِ.
- ب. المسافةُ بين الشقَّيْنِ حيثُ تمرُّ الموجاتُ الضوئيَّةُ.
- ج. المسافةُ بينَ هدبَتَي تداخلٍ مضيئَتَيْنِ.
- د. المسافةُ بينَ هدبتَيْ تداخلٍ مظلمَتَيْنِ.

2. يحدثُ التداخلُ الإتلافيُّ التامُّ لموجتَيْنِ لهما السعةُ نفسُها والطولُ الموجيُّ نفسُه:
- أ. إذا كانَ لهما الطورُ نفسُه دائمًا.
- ب. إذا كانَ الفرقُ في الطورِ بينهما 90^{o} دائمًا.
- ج. إذا كانَ الفرقُ في الطورِ بينهما 180^{o} دائمًا.
- د. إذا كانَ الفرقُ في الطورِ بينهما 270^{o} دائمًا.

3. أيٌّ من المعادلاتِ التاليةِ تشكِّلُ الشرطَ المطلوبَ لملاحظةِ الهدبةِ المظلمةِ الثالثةِ في نموذجِ التداخلِ؟
- أ. $d \sin\theta = \lambda/2$
- ب. $d \sin\theta = 3\lambda/2$
- ج. $d \sin\theta = 5\lambda/2$
- د. $d \sin\theta = 3\lambda$

4. لماذا تسهلُ ملاحظةُ حيودِ الصوتِ، بالمقارنةِ مع حيودِ الضوءِ المرئيِّ؟
- أ. يسهلُ رصدُ الموجاتِ الصوتيَّةِ، بالمقارنةِ مع الموجاتِ الضوئيَّةِ المرئيَّةِ.
- ب. الطولُ الموجيُّ للموجاتِ الصوتيَّةِ أطولُ من الطولِ الموجيِّ للموجاتِ الضوئيَّةِ المرئيَّةِ، لذلك هي تنحني حولَ الحواجزِ.
- ج. الموجاتُ الصوتيَّةُ موجاتٌ طوليَّةٌ، وهي تحيدُ أكثرَ من الموجاتِ المستعرضةِ.
- د. سعةُ الموجاتِ الصوتيَّةِ أكبرُ من سعةِ الموجاتِ الضوئيَّةِ.

5. موجاتٌ أحاديَّةُ اللونِ تحتَ الحمراءِ، طولُها الموجيُّ 750 nm، تمرُّ في شقَّيْنِ ضيِّقَيْنِ. إذا كانتِ المسافةُ بينَ الشقَّيْنِ 25 μm، فكم تكونُ زاويةُ رصدِ الهدبةِ المضيئةِ الرابعةِ على الشاشةِ؟
- أ. 4.3^{o}
- ب. 6.0^{o}
- ج. 6.9^{o}
- د. 7.8^{o}

6. ضوءٌ أحاديُّ اللونِ طولُهُ الموجيُّ 640 nm، يدخلُ خلالَ محزوزِ حيودٍ فيه 5.0×10^{4} خط/m، ويظهرُ خطٌّ مضيءٌ على الشاشةِ من خلالِ زاويةِ 11.1^{o} مع الهدبةِ المركزيَّةِ المضيئةِ. ما رتبةُ هذا الخطِّ؟
- أ. $m = 2$
- ب. $m = 4$
- ج. $m = 6$
- د. $m = 8$

7. أيُّ خاصيَّةٍ لليزرِ تؤدّي إلى إصدارِ ضوءٍ متشاكهٍ؟
- أ. الشدَّةُ المختلفةُ.
- ب. تضخيمُ الضوءِ.
- ج. أحاديَّةُ اللونِ.
- د. الانبعاثُ المحفّزُ.

8. أيٌّ ممّا يلي ليسَ جُزءًا مُهمًّا من مكوِّناتِ الليزرِ؟
- أ. مرآةٌ نصفُ شفّافةٍ.
- ب. مرآةٌ عاكسةٌ كليًّا.
- ج. عدسةٌ لامَّةٌ.
- د. وسطٌ فعّالٌ.

أسئلةٌ ذاتُ إجابةٍ قصيرةٍ

9. لماذا يفضَّلُ استعمالُ الليزرِ في القياساتِ الفلكيَّةِ؟

10. يؤدّي محزوزُ حيودٍ في مطيافٍ، إلى إنتاجِ الهدبةِ المضيئةِ الثالثةِ بزاويةِ 6.33^{o} مع الهدبةِ المركزيّةِ $(m = 0)$، لدى استعمالِ ضوءٍ أزرقَ طولُه الموجيُّ 490 nm، فما عددُ خطوطِ المحزوزِ في السنتيمترِ الواحدِ؟

أسئلةٌ ذاتُ إجابةٍ مطوَّلةٍ

أجبْ عن الأسئلةِ 11-13 بناءً على المعلوماتِ أدناه.

تمَّ بناءُ جهازِ تداخلِ شقَّيْنِ، المسافةُ بينَهما 15.0 μm، تظهرُ الهدبةُ الأولى للتداخلِ البنّاءِ خلالَ زاويةِ 2.25^{o} مع الهدبةِ المركزيَّةِ الصفريَّةِ $(m = 0)$.

11. ما الطولُ الموجيُّ للضوءِ المستعملِ؟

12. عندَ أيِّ زاويةٍ تظهرُ الهدبةُ المضيئةُ الثالثةُ $(m = 3)$؟

13. عندَ أيِّ زاويةٍ تظهرُ الهدبةُ المظلمةُ الثالثةُ $(m = 2)$؟



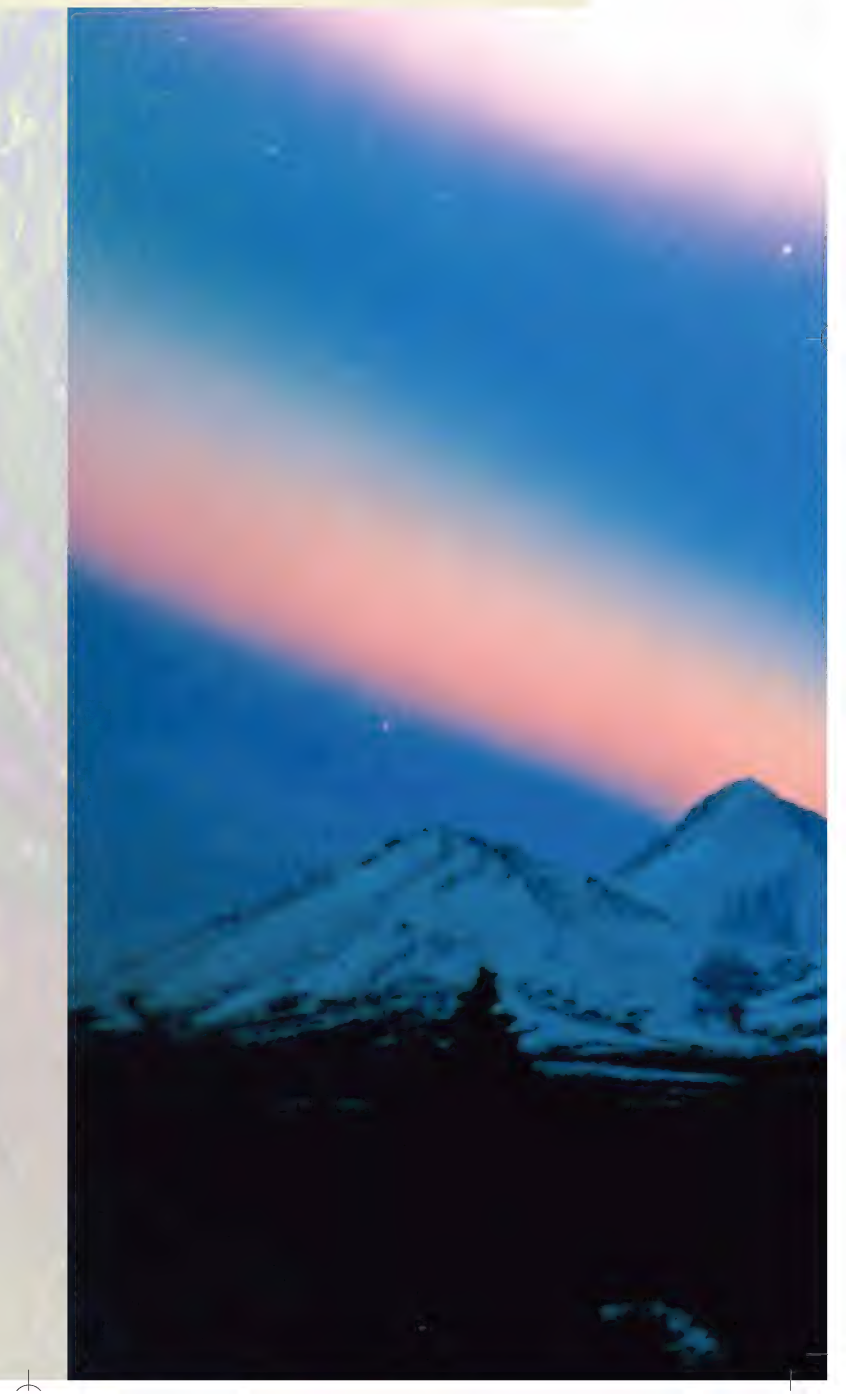
الفصـــــل 8

الفيزياءُ الذرّيّة

Atomic Physics



الأنوارُ المزيَّنةُ بالألوانِ والظاهرةُ في الصورةِ، قد تمتدُّ آلافَ الكيلومتراتِ وتظهرُ بشكلِ أقواسٍ أو شرائطَ أو حزمٍ متذبذبةٍ من اللونِ، تومضُ ثم تخبو. سببُ هذه الظاهرةِ البلايينُ من القفزاتِ الذرّيَّةِ.



ما يُتوقَّعُ تحقيقُهُ

تتعلَّمُ في هذا الفصلِ عن تكمّي الطاقةِ وأهمّيتِها في وصفِ إشعاعِ الجسمِ الأسودِ.

ما أهمّيّتُه

التناقضُ المسمّى بنكبةِ فوقَ البنفسجيِّ يكشفُ الخطأَ في تنبُّؤِ الفيزياءِ التقليديَّةِ حولَ الطاقةِ الكلّيَّةِ اللامتناهيةِ لإشعاعاتِ الجسمِ الأسودِ.

محتوى الفصل 8

1 تكمّي الطاقةِ
- إشعاعُ الجسمِ الأسودِ
- التأثيرُ الكهروضوئيُّ

2 نماذجُ الذرَّةِ
- النماذجُ الأولى للذرَّةِ
- الأطيافُ الذرّيَّةُ
- نموذجُ بور لذرَّةِ الهيدروجين



تكمّي الطاقةِ

Quantization of Energy

8-1 أهداف القسم

- يبيّنُ كيفَ استطاعَ بلانْك تحليلَ نكبةِ فوقَ البنفسجيِّ في إشعاعِ الجسمِ الأسودِ.
- يحسبُ طاقةَ الكمّاتِ للفوتوناتِ مستعملاً معادلةَ بلانْك.
- يحلُّ مسائلَ متعلِّقةً بالطاقةِ القصوى للحركةِ، ودالّةِ الشغلِ وتردُّدِ العتبةِ في التأثيرِ الكهروضوئيِّ.

إشعاعُ الجسمِ الأسودِ

مع نهايةِ القرنِ التاسعَ عشرَ، اعتقدَ العلماءُ أن الفيزياءَ التقليديَّةَ قد اكتملَتْ تقريبًا. أحدُ الأسئلةِ القليلةِ الباقيةِ والواجبُ حلُّها يتعلَّقُ بالإشعاعِ الكهرومغناطيسيِّ والديناميكا الحراريَّةِ. لذلكَ انصبَّ اهتمامُ العلماءِ تحديدًا على توهُّجِ الأجسامِ، عندَما تصلُ إلى درجةِ حرارةٍ مرتفعةٍ.

ينبعثُ من جميعِ الأجسامِ إشعاعٌ كهرومغناطيسيٌّ. يتألَّفُ فعليًّا هذا الإشعاعُ، الذي يعتمدُ على درجةِ الحرارةِ وخصائصَ أخرى للجسمِ، من توزيعٍ متَّصلٍ للأطوالِ الموجيَّةِ، بدءًا من تحتَ الحمراءِ، مرورًا بالمرئيِّ، وانتهاءً بالمناطقِ فوقَ البنفسجيَّةِ للطيفِ.

عندَ درجاتِ حرارةٍ متدنّيةٍ، تكونُ الأطوالُ الموجيَّةُ للإشعاعِ، بشكلٍ أساسيٍّ، في منطقةِ تحتَ الحمراءِ، ما يجعلُ العينَ البشريَّةَ غيرَ قادرةٍ على رؤيتِها. لدى ارتفاعٍ في درجةِ حرارةِ الجسمِ ينزاحُ نطاقُ الأطوالِ الموجيَّةِ المنبعثةِ في اتِّجاهِ النطاقِ المرئيِّ للطيفِ الكهرومغناطيسيِّ. المعدنُ المنصهرُ، مثلاً، في **الشكل 8-1** يُظهرُ توهُّجًا أصفرَ. وعندَ درجةِ حرارةٍ أعلى يبدو وهجُ الجسمِ أبيضَ، كالذي ينبعثُ من فتيلِ التنكسْتِنِ في المصباحِ الضوئيِّ، ثمّ يتوهَّجُ الجسمُ باللونِ الأزرقِ.



الشكل 8-1
هذا المعدنُ المنصهرُ يتوهَّجُ بلونٍ أصفرَ ساطعٍ، لأنه عندَ درجةِ حرارةٍ مرتفعةٍ.

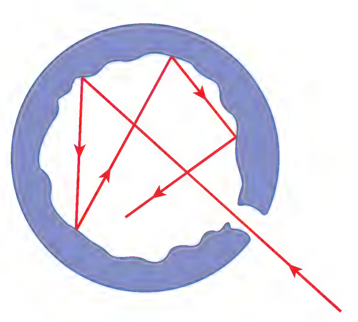
الفيزياءُ التقليديَّةُ وإشعاعُ الجسمِ الأسودِ

كانَتْ إحدى المشكلاتِ الناشئةِ في نهايةِ القرنِ الثامنَ عشرَ تدورُ حولَ توزيعِ الأطوالِ الموجيَّةِ المنبعثةِ من الجسمِ الأسودِ. فمعظمُ الأجسامِ تمتصُّ بعضَ الإشعاعاتِ الساقطةِ عليها وتعكسُ الباقيَ.

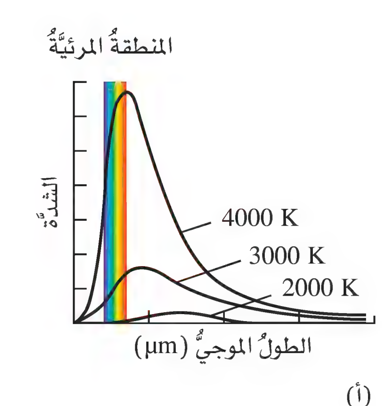
يُسمّى النظامُ المثاليُّ الذي يمتصُّ الإشعاعاتِ الساقطةَ جميعَها *الجسمَ الأسودَ*. يدرسُ الفيزيائيّون **إشعاعَ الجسمِ الأسودِ** blackbody radiation من خلالِ جسمٍ مجوَّفٍ كالظاهرِ في **الشكل 8-2**. يُعدُّ هذا النظامُ الذي يحبسُ الإشعاعَ مثالاً جيِّدًا على كيفيَّةِ عملِ الجسمِ الأسودِ. يكونُ الضوءُ المنطلقُ من خلالِ الفتحةِ في حالةِ اتِّزانٍ، مع الضوءِ المنعكسِ من جدرانِ الجسمِ، لأن الضوءَ ينفذُ من خلالِ الفتحةِ، ويعادُ امتصاصُه إلى تجويفِ الجسمِ مرّاتٍ عدَّةً.

إشعاعُ الجسمِ الأسودِ

الإشعاعُ المُنبعثُ من جسمٍ أسودَ، والذي يشعُّ ويُمتصُّ بشكلٍ مثاليٍّ، ويبعثُ إشعاعاتٍ تعتمدُ فقط على درجةِ حرارتِه.

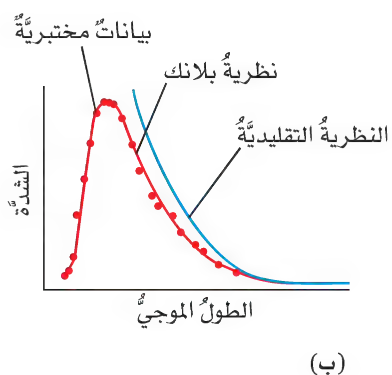


الشكل 8-2
يدخلُ الضوءُ هذا الجسمَ المجوَّفَ عبرَ فتحةٍ صغيرةٍ، فيصدمُ الجدارَ الداخليَّ. يمتصُّ الجدارُ جزءًا من الطاقةِ، وينعكسُ الجزءُ الآخرُ بزاويةٍ عشوائيَّةٍ. بعدَ عدَّةِ انعكاساتٍ يمتصُّ الجدارُ الداخليُّ للجسمِ الطاقةَ الساقطةَ بأكملِها تقريبًا، ما عدا جزءًا بسيطًا جدًّا يتسرَّبُ إلى الخارجِ عبرَ الفتحةِ.



(أ)





(ب)

الشكل 3-8
(أ) يُظهرُ الشكلُ شدَّةَ إشعاعِ الجسمِ الأسودِ عندَ ثلاثِ درجاتِ حرارةٍ مختلفةٍ. (ب) لم تتطابقْ توقُّعاتُ النظريةِ التقليديَّةِ حولَ إشعاعِ الجسمِ الأسودِ (المنحنى الأزرق) مع البياناتِ المختبريَّةِ (النقاطِ البيانيَّةِ الحمراءِ) لكلِّ الأطوالِ الموجيَّةِ، في حين أن نظريَّةَ بلانك (المنحنى الأحمر) قد تطابقَتْ.

يُظهرُ **الشكلُ 3-8** (أ) بياناتٍ مختبريَّةً للأشعَّةِ التي يطلقُها جسمٌ أسودُ عندَ ثلاثِ درجاتِ حرارةٍ مختلفةٍ. من الملاحظِ أن ارتفاعَ درجةِ الحرارةِ، يرافقُه ازديادُ كمّيَّةِ الطاقةِ الكلّيَّةِ المنطلقةِ من الجسمِ (المساحةِ تحتَ المنحنى). كذلك يرافقُه انزياحُ ذروةِ التوزيعِ إلى طرفِ الأطوالِ الموجيَّةِ الأقصرِ.

لم يستطعِ العلماءُ تفسيرَ هذه النتائجِ المختبريَّةِ بوساطةِ الفيزياءِ التقليديَّةِ. يقارنُ **الشكلُ 3-8** (ب) التخطيطَ البيانيَّ المختبريَّ لطَيفِ إشعاعِ الجسمِ الأسودِ (النقاطِ الحمراءِ) مع الصورةِ النظريَّةِ للشكلِ الذي يجبُ أن يكونَ للمنحنى بالاستنادِ إلى النظريّاتِ التقليديَّةِ (المنحنى الأزرق). توقَّعُ النظريةُ التقليديَّةُ أن اقترابَ الطولِ الموجيِّ من الصفرِ، يرافقُه اقترابُ كمّيَّةِ الطاقةِ الإشعاعيَّةِ من اللانهاية، في حين أن النتائجَ المختبرية تؤشر على زيادة أولية للطاقة الإشعاعية بنقصان الطول الموجي. هذه الزيادةُ تستمر إلى طول موجي معين، حيث إذا استمر نقصان الطول الموجي فإن الطاقة الإشعاعية تبدأ بالتناقص. وعند الأطوال الموجية القصيرة جدًا والقريبة من الصفر تقترب الطاقة الإشعاعية من الصفر هذا التناقضُ يُسمّى عادةً **نكبة فوقَ البنفسجيِّ** ultraviolet catastrophe، لأن عدمَ الاتفاقِ يحدثُ عندَ الطرفِ فوقَ البنفسجيِّ للطيفِ.

نكبةُ فوقَ البنفسجيِّ

التوقُّعُ الخاطئُ للفيزياءِ التقليديَّةِ والذي يفترضُ أن الطاقة التي يشعها الجسم الأسود تزداد زيادة هائلة عند اقتراب الأطوال الموجية من الصفر.

البياناتُ المختبريَّةُ لإشعاعِ الجسمِ الأسودِ وتكمّي الطاقةِ

في عام 1900، طوَّرَ ماكس بَلانْك (1858-1947) معادلةً لإشعاعِ الجسمِ الأسودِ، توافقَتْ تمامًا مع البياناتِ المختبريَّةِ على كلِّ الأطوالِ الموجيَّةِ. تُعدُّ النظريةُ الأصليَّةُ لبلانك مجرَّدةً إلى حدٍّ ما، لأنها تتضمَّنُ جدالاً يستندُ إلى الأنتروبيا والديناميكا الحراريَّةِ. وقد أوردَ الكتابُ هذا الجدالَ ضمنَ سياقٍ سهلٍ حيث يبيِّنُ الجدالُ روحيةَ عمل بلانك الأصليِّ، وضخامةَ الصدمةِ التي سبَّبها.

طرحَ بلانك أن إشعاعَ الجسمِ الأسودِ ناتجٌ عن مذَبْذَباتٍ كهربائيَّةٍ دونَ مجهريَّةٍ تسمّى *مرنانات*. وافترضَ أن جدرانَ التجويفِ المشعِّ تتألَّفُ من بلايينِ المرناناتِ، تتذبذبُ كلُّها بتردُّداتٍ مختلفةٍ. بالرغمِ من أن معظمَ العلماءِ قد افترضوا، بشكلٍ طبيعيٍّ، أن طاقةَ هذه المرناناتِ متَّصلةٌ، فإن بلانك افترضَ، بشكلٍ مناقضٍ تمامًا، أن باستطاعةِ هذه المرناناتِ امتصاصَ وإطلاقَ كمّيّاتٍ محدَّدةٍ ومنفصلةٍ فقط من الطاقةِ.

في البدايةِ، عندَما اكتشفَ بلانك هذه الفكرةَ، كانَ يستعملُ تقنيَّةً رياضيَّةً تفترضُ أن الكمّيّاتِ المعروفةَ بأنها متَّصلةٌ، هي، بشكلٍ مؤقتٍ، محدَّدةٌ ومنفصلةٌ. وعندَ الانتهاءِ من الحساباتِ، اعتُبِرت هذه الوحداتُ المنفصلةُ متناهيةَ الصغرِ. توصَّلَ بلانك إلى أن تلك الحساباتِ تصبحُ مجديةً إذا حذفَ هذه الخطوةَ. واعتبرَ، في جميعِ حساباتِه، أن الطاقةَ تأتي بوحداتٍ منفصلةٍ. بهذه الطريقةِ، وجدَ بلانك أن الطاقةَ الكلّيَّةَ (E_n)

لمرنانٍ بتردُّدٍ f تساوي عددًا صحيحًا من hf، أي:

$$E_n = nhf$$

حيثُ تمثِّلُ n عددًا صحيحًا موجبًا يسمّى *العددَ الكمّيّ*، ويمثِّلُ العاملُ h ثابتَ بلانك ويساوي $6.626\ 0693 \times 10^{-34}$ J•s. لتبسيطِ الحساباتِ في الكتابِ، نستعملُ القيمةَ التقريبيَّةَ $h = 6.63 \times 10^{-34}$ J•s.

بما أن طاقةَ كلِّ مرنانٍ يُعبَّرُ عنها، في هذا الكتابِ، بوحداتٍ منفصلةٍ، فيُقال إن المرنانَ *مُكَمَّى*، وتُسمّى حالاتُ الطاقةِ المسموحُ بها *حالاتِ الكمِّ*، أو *مستوياتِ الطاقةِ*. بناءً على فرضيَّةِ أن الطاقةَ مكمّاةٌ، استطاعَ بلانك اشتقاقَ المنحنى الأحمرِ الظاهرِ في **الشكل 8-3 (ب)**.

تبعًا لنظريةِ بلانك، تمتصُّ المرناناتُ الطاقةَ وتطلقُها بمضاعفاتٍ منفصلةٍ من hf. استطاعَ آينشتاين، مؤخَّرًا، تطبيقَ مفهومِ الطاقةِ المكمّاةِ على الضوءِ، حيثُ تُمتصُّ وحداتُ طاقةِ الضوءِ، المسمّاةُ *كمّاتٍ* (تُسمّى الآن فوتوناتٍ)، أو تُطلقُ، نتيجةَ قفزِ الإلكتروناتِ من حالةِ كمٍّ إلى حالةٍ أخرى. تُظهرُ المعادلةُ أعلاه التالي: عندَما يتغيَّرُ العددُ الكمّيُّ n بوحدةٍ، تتغيَّرُ كمّيَّةُ الطاقةِ المنبعثةِ بـ hf. لذا تعطى طاقةُ الكمِّ الضوئيِّ، والمطابقةُ لفرقِ الطاقةِ بين مستويَيْن متجاورَيْن، بالمعادلةِ التاليةِ:

طاقةُ كمٍّ ضوئيٍّ (فوتون)

حيث ($n = 1$) $$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

طاقةُ الفوتون = ثابتُ بلانك × الترَدُّد = (ثابتُ بلانك × سرعةِ الضوءِ في الفراغ) / الطولِ الموجيِّ

يشعُّ المرنانُ أو يمتصُّ طاقةً فقط عندَما يغيِّرُ حالاتِ الكمِّ. وفكرةُ أن الطاقةَ وحداتٌ منفصلةٌ شهدَتْ ولادةَ نظريَّةٍ جديدةٍ تُسمّى *ميكانيكا الكمِّ*.

لدى التعبيرِ عن ثابتِ بلانك بالوحدةِ J•s يُعبَّرُ عن الطاقةِ في المعادلةِ $E = hf$ بالوحدةِ J. لكن، لدى التعاملِ مع أجزاءِ الذرّاتِ، يُفضَّلُ عادةً التعبيرُ عن الطاقةِ بوحدةِ إلكترون ڤولت (eV) التي تُعرَّفُ بأنها الطاقةُ التي يكتسبُها إلكترونٌ أو بروتونٌ عندَما يتسارعُ عبرَ فرقِ جُهدِ 1 V. بما أن 1 V = 1 J/C فإن علاقةَ الـ eV بالجول (J) تكونُ كالتالي:

$$1\ \text{eV} = 1.60 \times 10^{-19}\ \text{C•V} = 1.60 \times 10^{-19}\ \text{C•J/C} = 1.60 \times 10^{-19}\ \text{J}$$

كانَتْ فكرةُ بلانك عن تكمّي الطاقةِ جذريَّةً إلى حدٍّ دفعَ معظمَ العلماءِ، ومنهم بلانك، إلى اعتبارِها غيرَ واقعيَّةٍ. ذلك أن بلانك اعتبرَ افتراضَهُ هذا طريقةً رياضيَّةً تصلحُ للحساباتِ، وليسَ للتفسيرِ الفيزيائيِّ. لذلك تابعَ بلانك مع علماءَ آخرين البحثَ عن تفسيرٍ مختلفٍ لإشعاعِ الجسمِ الأسودِ، يتوافقُ مع الفيزياءِ التقليديَّةِ.

مثال 8 (أ)

طاقةُ الكمِّ (الفوتون)

المسألة

في ذروةِ طيفِ الإشعاعِ الشمسيِّ، يحملُ كلُّ فوتون حوالي 2.7 eV من الطاقةِ. ما تردُّدُ هذا الضوءِ؟

الحـــلّ

1. أعرِّف

المعطى: $E = 2.7\ \text{eV}$ $\qquad h = 6.63 \times 10^{-34}\ \text{J·s}$

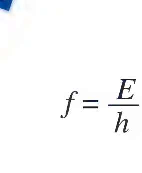
المجهول: $f = ?$

2. أخطِّط

أستعملُ معادلةً لطاقةِ كمٍّ ضوئيٍّ وأعزلُ التردُّدَ.

$$E = hf \quad \text{أو} \quad f = \frac{E}{h}$$

3. أحسب



$$f = \frac{E}{h} = \frac{(2.7\ \text{eV})(1.60 \times 10^{-19}\ \text{J/eV})}{6.63 \times 10^{-34}\ \text{J·s}}$$

$$\boxed{f = 6.5 \times 10^{14}\ \text{Hz}}$$

ملاحظة

احرصْ دائمًا أن يكونَ اختصارُ الوحداتِ صحيحًا. تحتاجُ في هذه المسألة إلى تحويلِ الطاقةِ من eV إلى J. لهذا السببِ ضُرِبَت الطاقةُ 2.7 eV في عاملِ التحويلِ 1.60×10^{-19} J/eV.

تطبيق 8 (أ)

طاقةُ الكمّ (الفوتون)

1. افترضْ أن عقاربَ ساعةِ الحائط تمثِّلُ أحدَ مرناناتِ بلانك. ما تردُّدُها عندَ نقلِها، في تغيُّرٍ كمّيٍّ واحدٍ، طاقةً مقدارُها 8.1×10^{-15} eV؟ (لاحظْ أن تغيُّرًا صغيرًا كهذا في الطاقةِ يصعُبُ قياسُه، لذلك لا نستطيعُ ملاحظةَ تأثيراتِ الكمِّ في عالمٍ ذي نطاقٍ واسعٍ.)

2. يهتزُّ نظامُ نابض–كتلة بتردُّدٍ 0.56 Hz. كم ينقلُ من طاقةِ هذه الاهتزازةِ في تغيُّرٍ كمّيٍّ واحدٍ؟

3. في تجربةٍ مختبريَّةٍ، تبلغُ طاقةُ فوتون 5.0 eV. ما تردُّدُ الفوتونِ؟

4. يصلُ الإشعاعُ المنبعثُ من جلدِ الإنسانِ إلى ذروتِه عند $\lambda = 940\ \mu\text{m}$.

أ. ما تردُّدُ هذا الإشعاعِ؟

ب. ما نوعُ الموجاتِ الكهرومغناطيسيَّةِ هذه؟

ج. كم تبلغُ الطاقةُ، بوحداتِ eV، التي يحملُها فوتونٌ من هذا الإشعاعِ؟

التأثيرُ الكهروضوئيُّ

درسْتَ في فصلِ «الحثُّ الكهرومغناطيسيُّ» كيفَ اكتشفَ جيمس ماكسويل عامَ 1873 أن الضوءَ شكلٌ من موجاتٍ كهرومغناطيسيَّةٍ. وقدَّمَتِ التجاربُ التي أجراها هاينرتش هيرتز دعمًا مختبريًّا لنظرياتِ ماكسويل. لكن لم يكنْ بالإمكانِ تفسيرُ نتائجِ بعضٍ من تجاربِ هيرتز الأخيرةِ بوساطةِ نموذجِ الموجةِ لطبيعةِ الضوءِ. إحدى هذه التجاربِ كانَتِ **التأثيرَ الكهروضوئيَّ** photoelectric effect. عندَما يصدمُ الضوءُ سطحًا معدنيًّا، قد يطلقُ السطحُ إلكترونات، كما يظهرُ في **الشكلِ 8-4**. يُسمّي العلماءُ هذه الظاهرةَ التأثيرَ الكهروضوئيَّ، وتُسمّى الإلكتروناتُ المنبعثةُ *إلكتروناتٍ ضوئيَّةً*. كما توصفُ تلك الأسطحُ ذاتُ خاصّيةِ التأثيرِ الكهروضوئيِّ بأنها *حسّاسةٌ للضوءِ*.

التأثيرُ الكهروضوئيُّ

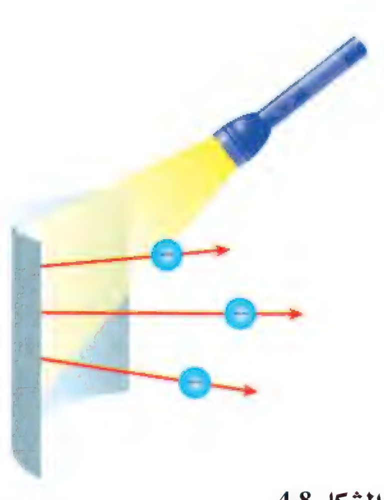
انبعاثٌ للإلكتروناتِ من سطحِ مادَّةٍ، يحدثُ عندَما يشعُّ ضوءٌ بتردُّداتٍ معيَّنةٍ على سطحِ المادَّةِ.

الفيزياءُ التقليديَّةُ والتأثيرُ الكهروضوئيُّ

الحقيقةُ القائلةُ أن باستطاعةِ موجاتِ الضوءِ نزعُ إلكتروناتٍ من سطحٍ معدنيٍّ لا تتناقضُ مع مبادئِ الفيزياءِ التقليديَّةِ. لموجاتِ الضوءِ طاقةٌ، فإذا كانَتْ هذه الطاقةُ كافيةً، يمكنُ للإلكترونِ أن يُنزعَ عن السطحِ بطاقةٍ تكفيه ليتحرَّرَ فيفلتَ من المعدنِ. عند هذا المستوى، لا يمكنُ تفسيرُ ما تبقّى من تفاصيلِ التأثيرِ الكهروضوئيِّ، بالاستنادِ إلى النظريّاتِ التقليديَّةِ. ولتحديدِ موقعِ التضاربِ يجبُ أن نأخذَ في الحسبانِ ما يحدثُ تبعًا للنظريةِ التقليديَّةِ.

بعدَ ذلك نُقارنُ هذه التوقُّعاتِ مع المعطياتِ والملاحظاتِ المختبريَّةِ. سبقَ أن درسْتَ أن شدَّةَ الموجةِ تزدادُ بازديادِ طاقتِها. إذن، وتبعًا للفيزياءِ التقليديَّةِ، يجبُ أن يكونَ لموجاتِ الضوءِ مهما يكنْ تردُّدها طاقةٌ تكفي لنزعِ إلكتروناتٍ عن المعدنِ، شرطَ أن تكونَ شدَّةُ الضوءِ عاليةً بشكلٍ كافٍ.

إضافةً إلى ذلك يمكنُ أن تُنزعَ الإلكتروناتُ تحتَ شدَّةِ ضوءٍ منخفضةٍ، إذا شعَّ الضوءُ على المعدنِ لفترةٍ زمنيَّةٍ كافيةٍ. (قد يستغرقُ بعضَ الوقتِ امتصاصُ الإلكتروناتِ للطاقةِ الساقطةِ، قبلَ أن تكتسبَ طاقةَ حركيةٍ كافيةً لتفلتَ من المعدنِ.) بالإضافةِ إلى ذلك، فإن الزيادةَ في شدَّةِ موجاتِ الضوءِ يجبُ أن تُزيدَ من الطاقةِ الحركيةِ للإلكتروناتِ الضوئيَّةِ ويجبُ عندئذٍ استعمالُ شدَّةِ الضوءِ لتحديدِ الطاقةِ الحركيةِ القصوى، لأيِّ إلكترونٍ. تتلخَّصُ هذه التوقُّعاتُ التقليديَّةُ في العمودِ الثاني من **الجدولِ 8-1**.



الشكل 8-4

حزمةُ ضوءٍ تشعُّ على معدنٍ قد تُطلقُ إلكتروناتٍ من المعدنِ. يُسمّى هذا التفاعلُ الذي يتعلّقُ بالضوءِ والإلكتروناتِ معًا، التأثيرَ الكهروضوئيَّ.

الجدول 8-1 التأثيرُ الكهروضوئيُّ

	توقُّعاتٌ تقليديَّةٌ	دليلٌ مختبريٌّ
تحرُّرُ الإلكتروناتِ يعتمدُ على...	شدَّةِ الضوءِ.	تردُّدُ الضوءِ.
الطاقةُ الحركيةِ للإلكتروناتِ المقذوفةِ تعتمدُ على...	شدَّةِ الضوءِ.	تردُّدُ الضوءِ.
عند شدَّاتِ ضوءٍ منخفضةٍ، تحرُّرُ الإلكترونِ...	يستغرقُ وقتًا.	يحدثُ في معظمِ الأحيانِ لحظيًّا فوقَ تردُّدٍ معيَّنٍ.

وجدَ العلماءُ أن أيًّا من هذه التوقُّعاتِ التقليديَّةِ لم يُلاحظ تحقُّقُه مختبريًّا. لا تتحرَّرُ الإلكتروناتُ عندما يكون تردُّدُ الضوءِ الساقطِ أقلَّ من تردُّدٍ معيَّنٍ، حتى ولو كانَتْ شدَّةُ الضوءِ مرتفعةً. يُسمّى هذا التردُّدُ الذي يختلفُ من معدنٍ إلى آخرَ *بتردُّدِ العتبةِ* (f_o).

إذا تجاوزَ تردُّدُ الضوءِ تردُّدَ العتبةِ، يُلاحظُ التأثيرُ الكهروضوئيُّ الذي يُحرِّرُ عددًا من الإلكتروناتِ الضوئيَّةِ. يتناسبُ عددُ هذهِ الإلكتروناتِ المنبعثةِ طرديًّا مع شدَّةِ الضوءِ. أما الطاقةُ القصوى لحركتِها فلا تعتمدُ على شدَّةِ الضوءِ، بل تزدادُ مع الزيادةِ في التردُّدِ. بالإضافةِ إلى ذلك، فإن انبعاثَ الإلكتروناتِ الضوئيَّةِ من السطحِ يحدثُ، في معظمِ الأحيانِ، لحظيًّا حتّى عندَ شدَّةِ ضوءٍ منخفضةٍ. انظرِ **الجدولَ 8-1**.

آينشتاين وتكمّي جميعِ الموجاتِ الكهرومغناطيسيَّةِ

استطاعَ ألبرت آينشتاين حلَّ هذه المعضلةِ من خلالِ دراسةٍ كتبَها عامَ 1905 عن التأثيرِ الكهروضوئيِّ، حيث توسَّعَ في مفهومِ التكميةِ عند بلانك إلى الموجاتِ الكهرومغناطيسيَّةِ، التي نالَ عليها جائزةَ نوبل عامَ 1921.

افترضَ آينشتاين أن من الممكنِ اعتبارَ الموجاتِ الكهرومغناطيسيَّةِ أشبهَ بدفقٍ من جسيماتٍ، تسمّى الآن **فوتونات** photons. ويكونُ لكلِّ فوتونٍ كمّيَّةٌ من الطاقةِ E، عبَّرتْ عنها معادلةُ بلانك ($E = hf$). في هذه النظريَّةِ يجري امتصاصُ كلِّ فوتونٍ كوحدةٍ، بوساطةِ إلكترون. وعندَ انتقالِ طاقةِ فوتونٍ إلى إلكترونٍ في معدنٍ، يكتسبُ الإلكترونُ هذه الطاقةَ التي تساوي hf.

الفوتون

أصغر كم من الإشعاع الكهرومغناطيسي، وكتلته صفر.

تردُّدُ العتبةِ ودالَّةُ الشغلِ

لكي يفلتَ الإلكترونُ من المعدن، لا بُدَّ أن يتغلَّبَ على القوَّةِ التي تربطُه بالمعدن. يتطلَّبُ هذا الإفلاتُ من سطحِ المعدنِ أن يتوفَّرَ للإلكترونِ كمّيَّةٌ دنيا من الطاقةِ تُسمّى **دالَّةَ الشغلِ** work function للمعدن. تُساوي دالَّةُ الشغلِ hf_o حيث f_o تردُّدُ العتبةِ للمعدن. باستطاعةِ فوتوناتٍ حاملةٍ لطاقةٍ أكبرَ من hf_o أن تُطلِقَ إلكتروناتٍ من السطحِ ومن داخلِ المعدنِ. بما أن الطاقةَ يجبُ أن تكونَ محفوظةً، فإن الطاقةَ الحركيةَ القصوى (للإلكتروناتِ الضوئيَّةِ المنطلقةِ من السطحِ) تساوي الفرقَ بين طاقةِ الفوتونِ ودالَّةِ الشغلِ للمعدنِ. يُعبَّرُ رياضيًّا عن هذه العلاقةِ بالمعادلةِ التاليةِ:

دالَّةُ الشغلِ

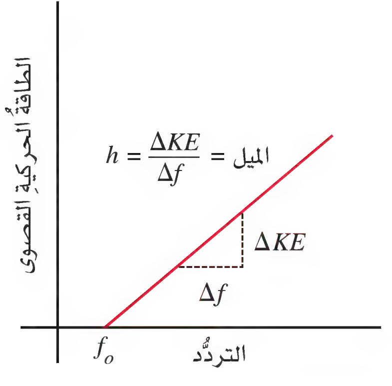
أقلُّ كمّيَّةٍ من الطاقةِ اللازمةِ لنزعِ إلكترونٍ من سطحِ المعدنِ.

الطاقةُ الحركيةِ القصوى للإلكترونِ الضوئيِّ

$$KE_m = hf - hf_o$$

الطاقةُ الحركيةِ القصوى = (ثابت بلانك × تردُّد الفوتون الساقط) – دالَّة الشغل

تبعًا لهذه المعادلةِ، يجبُ أن تكونَ هناك علاقةٌ خطّيةٌ بين f و KE_m، لأن h كمّيَّةٌ ثابتةٌ، ودالَّةَ الشغلِ، hf_o، ثابتةٌ لأيِّ معدنٍ معطى. وقد تحقَّقَتِ التجاربُ من صحَّةِ هذه العلاقةِ، كما يظهرُ في **الشكل 8-5**. وحسابُ ميلِ منحنى ($\Delta KE/\Delta f$) كهذا يعطي القيمةَ نفسَها لـ h، وهي مطابقةٌ لقيمةِ ثابتِ بلانك.



الشكل 8-5

يُظهرُ الشكلُ علاقةً خطّيَّةً بين الطاقةِ الحركيةِ القصوى للإلكتروناتِ المنبعثةِ وتردُّدِ الضوءِ الساقطِ. يمثِّلُ تقاطعُ المنحنى مع المحورِ الأفقيِّ تردُّدَ العتبةِ.

مثال 8 (ب)

التأثيرُ الكهروضوئيُّ

المسألة

يشعُّ ضوءٌ تردُّده 1.00×10^{15} Hz على سطحٍ من صوديوم، فيُطلقُ إلكتروناتٍ ضوئيَّةً ذات طاقةٍ حركيةٍ قصوى تساوي 1.78 eV. جدِ تردُّدَ العتبةِ لهذا المعدنِ.

الحــلّ

1. أعرِّف

المعطى: $KE_m = (1.78 \text{ eV})(1.60 \times 10^{-19} \text{ J/eV}) = 2.85 \times 10^{-19} \text{ J}$

$f = 1.00 \times 10^{15} \text{ Hz}$

المجهول: $f_o = ?$

2. أخطِّط

أستعملُ تعبيرَ طاقةِ الحركةِ القصوى، وأحلُّ لإيجاد f_o.

$$KE_m = hf - hf_o$$

$$f_o = \frac{hf - KE_m}{h}$$

3. أحسب

$$f_o = \frac{(6.63 \times 10^{-34} \text{ J•s})(1.00 \times 10^{15} \text{ Hz}) - (2.85 \times 10^{-19} \text{ J})}{6.63 \times 10^{-34} \text{ J•s}}$$

$$\boxed{f_o = 5.70 \times 10^{14} \text{ Hz}}$$

تطبيق 8 (ب)

التأثيرُ الكهروضوئيُّ

1. تبيَّنَ، في حالةِ تأثيرٍ كهروضوئيٍّ، أن فوتوناتٍ ساقطةً بطاقةِ 5.00 eV على مادَّةٍ، تحرِّرُ إلكتروناتٍ بطاقةٍ حركيةٍ قصوى 3.00 eV. ما تردُّدُ العتبةِ لهذه المادَّةِ؟
2. يسقطُ ضوءٌ طولُه الموجي 350 nm على سطحٍ من البوتاسيوم. ما دالَّةُ الشغلِ للبوتاسيوم إذا كانَتِ الطاقةُ الحركيةُ القصوى للإلكتروناتِ الضوئيَّةِ 1.3 eV؟ وما تردُّدُ العتبةِ للبوتاسيوم؟
3. احسُبْ دالَّةَ الشغلِ للصوديوم، مستعملاً المعلوماتِ المعطاةَ في المثال 8 (ب).
4. أيُّ المعادنِ التاليةِ توصفُ بالتأثيرِ الكهروضوئيِّ، عندما يشعُّ عليها ضوءٌ تردُّدُه 7.0×10^{14} Hz؟
   - أ. ليثيوم، $hf_o = 2.3$ eV
   - ب. فضّة، $hf_o = 4.7$ eV
   - ج. سيزيوم، $hf_o = 2.14$ eV

نظريَّةُ الفوتونِ والتأثيرُ الكهروضوئيُّ

تفسِّرُ النظريَّةُ الفوتونيَّةُ للضوءِ جوانبَ التأثيرِ الكهروضوئيِّ التي ليسَ بالإمكانِ استيعابُها من خلالِ المفاهيمِ التقليديَّةِ. فالتأثيرُ الكهروضوئيُّ لا يمكنُ ملاحظتُه عندَ تردُّدٍ أقلَّ من تردُّدِ العتبةِ، لأن طاقةَ الفوتونِ يجبُ أن تكونَ أكبرَ أو تساوي دالَّةَ الشغلِ للمادَّةِ. وإذا لم تكنْ طاقةُ كلِّ فوتونٍ ساقطٍ أكبرَ أو تساوي دالَّةَ الشغلِ، فلا يمكنُ أبدًا للإلكترونات أن تُنتزعَ من السطحِ بغضِّ النظرِ عن عددِ الفوتوناتِ الموجودةِ (أو مدى ارتفاعِ الشدَّةِ). بما أن طاقةَ كل فوتونٍ تعتمدُ على تردُّدِ الضوءِ الساقطِ ($E = hf$)، فالتأثيرُ الكهروضوئيُّ غيرُ ملحوظٍ عندَما يكونُ تردُّدُ الضوءِ الساقطِ أقلَّ من تردُّدٍ معيَّنٍ (f_o).

إذا تضاعفَتْ شدَّةُ الضوءِ، يتضاعفُ عددُ الفوتوناتِ، وبدورِه يتضاعفُ عددُ الإلكتروناتِ المنطلقةِ من المعدنِ. لكنَّ معادلةَ الطاقةِ الحركيةِ القصوى للإلكترونِ تُظهرُ أن الطاقةَ الحركيةَ تعتمدُ فقط على تردُّدِ الضوءِ ودالَّةِ الشغلِ، وليسَ على شدَّةِ الضوءِ. إذن، وبالرغمِ من انبعاثِ المزيدِ من الإلكتروناتِ، فإن الطاقةَ الحركيةَ القصوى للإلكتروناتِ الفرديَّةِ تبقى نفسَها.

أخيرًا، فإن ظاهرةَ الانبعاثِ الفوريِّ للإلكتروناتِ تتوافقُ، في معظمِ الأحيانِ، مع النظريَّةِ الجسيميَّةِ للضوءِ، حيث تظهرُ الطاقةُ بشكلِ حزمٍ صغيرةٍ. وبما أن كلَّ فوتون يؤثِّرُ في إلكترونٍ واحدٍ، فليسَ هناك فارقٌ زمنيٌّ ملحوظٌ بين إشعاعِ الضوءِ على المعدنِ، وملاحظةِ انبعاثِ الإلكتروناتِ.

يُعدُّ نجاحُ آينشتاين في تفسيرِ التأثيرِ الكهروضوئيِّ، عندما افترضَ أن الموجاتِ الكهرومغناطيسيَّةَ مكمّاةٌ، حافزًا للعلماءِ، كي يدركوا أن تكمّي الطاقةِ يجبُ اعتبارُه وصفًا حقيقيًّا للعالَمِ الفيزيائيِّ، وليسَ بدعةً رياضيَّةً، كما كان يظنُّ في البدايةِ معظمُ هؤلاءِ العلماءِ. ولم يكنْ تجزيءُ الطاقةِ إلى وحداتٍ منفصلةٍ احتمالاً مقبولاً للتطبيقِ، لأن كمَّ الطاقةِ غيرُ ملموسٍ في خبراتِنا اليوميَّةِ. نتيجةً لذلك، بدأ العلماءُ بالاعتقادِ أن الطبيعةَ الحقيقيَّةَ للطاقةِ يمكنُ رؤيتُها في المستوى المجهريِّ للذرّاتِ والجزيئاتِ، حيثُ تصبحُ تأثيراتُ الكمِّ مهمّةً ومقيسةً.

هل تعلم؟

في العامِ 1905 نشرَ آينشتاين دراسةً حولَ التأثيرِ الكهروضوئيِّ، بينما كانَ يعملُ في مكتبِهِ في برن، بسويسرا. في العامِ نفسِه استطاعَ آينشتاين نشرَ ثلاثِ دراساتٍ مشهورةٍ أخرى، إحداها النظريَّةُ النسبيَّةُ.

الفيزياءُ والحياة

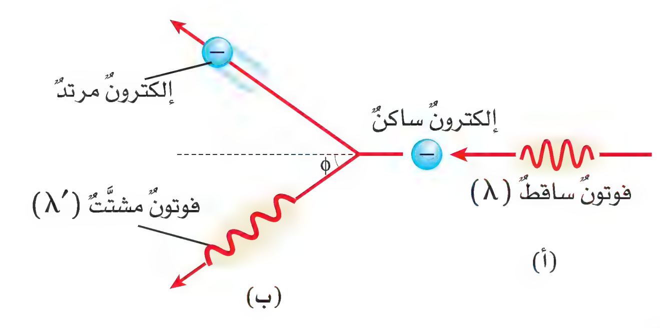
1. **التأثيرُ الكهروضوئيُّ** بالرغمِ من أن الضوءَ الأحمرَ الساطعَ يُسلِّطُ في ثانيةٍ طاقةً أكثرَ من الضوءِ البنفسجيِّ الخافتِ، فإنه لا يستطيعُ نزعَ إلكتروناتٍ من سطحٍ معدنيٍّ معيَّنٍ، في حينِ أن الضوءَ البنفسجيَّ الخافتَ يستطيعُ ذلكَ. كيف فسَّرَتْ نظريةُ الفوتون لآينشتاين هذه الملاحظةَ؟

2. **صورٌ فوتوغرافيَّةٌ** افترضْ أن صورةً قد التُقطَتْ لوجهِ شخصٍ، باستعمالِ بضعةِ فوتونات فقط. تبعًا لنظريةِ الفوتونِ لآينشتاين، هل تكونُ النتيجةُ صورةً باهتةً جدًّا للوجهِ بأكملِه؟ عللْ إجابتَك.

3. **الأجسامُ المشعَّةُ** يعتمدُ لونُ جسمٍ ساخنٍ على درجةِ حرارتِه. عندَما ترتفعُ درجةُ الحرارةِ، يتحوَّلُ اللونُ الأحمرُ إلى برتقاليٍّ، ثم إلى أصفرَ فأبيضَ، وأخيرًا إلى أزرقَ. لا تستطيعُ الفيزياءُ التقليديَّةُ تفسيرَ هذا التغيُّرِ في اللونِ، في حينِ أن ميكانيكا الكمِّ تستطيعُ ذلك. ما التفسيرُ الذي تقدِّمُه ميكانيكا الكمِّ؟



إزاحةُ كُمبتُن ونظريَّةُ الفوتونِ للضوءِ



الشكل 6-8

(أ) عندما يصطدمُ فوتونٌ مع إلكترونٍ،
(ب) يكونُ للفوتونِ المشتَّتِ طاقةٌ أقلُّ، وطولٌ موجيٌّ أطولُ من الفوتونِ الساقطِ.

أدركَ الفيزيائيُّ الأميركيُّ آرثر كمبتن (1892-1962) أن الضوءَ إذا تصرَّفَ كجُسيمٍ يجبُ أن يكونَ اصطدامُ إلكترونٍ بفوتونٍ شبيهًا بتصادمِ كرتَيْ بليارٍ. وبما أن الزخمَ الخطّي والطاقةَ محفوظانِ في التصادماتِ المرنةِ، فإنه عندما يصطدمُ فوتون مع إلكترونٍ ساكنٍ، كما في **الشكل 6-8**، ينقلُ الفوتونُ بعضًا من طاقتِه وزخمِه إلى الإلكترونِ. نتيجةً لذلك، تنخفضُ طاقةُ الفوتونِ المشتَّتِ وتردُّدُه، بينما يزدادُ طولُهُ الموجيُّ.

عام 1923، اختبرَ كمبتُن هذه النظريَّةَ بتوجيهِ موجاتٍ كهرومغناطيسيَّةٍ (أشعَّةِ X) نحو قالبٍ من الكرافيتِ (الرصاصِ الأسودِ). وجد أن الطولَ الموجيَّ للفوتونِ (λ') المشتَّتَ أطولُ من الطولِ الموجيِّ (λ) للفوتونِ الساقطِ، تمامًا كما توقَّعَ. يُسمّى هذا التغيُّرُ في الطولِ الموجيِّ **إزاحةَ كُمبتُن**($\Delta\lambda$) compton shift، حيث $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$ وهو يدعمُ نظريةَ الفوتونِ لآينشتاين.

تعتمدُ إزاحةُ كُمبتُن على زاويةِ تشتُّتِ الفوتونِ (ϕ). لاحظ أن أكثر تغيّر في الطول الموجي يكون صغير جدًّا بالمقارنة مع الطول الموجي للضوء المرئيّ. يجعلُ ذلك قياسَ إزاحةِ كُمبتن صعبًا للغايةِ باستخدام الضوء المرئي، لكنَّه ممكنٌ باستعمالِ الموجاتِ الكهرومغناطيسيَّةِ ذاتِ الأطوالِ الموجيَّةِ القصيرةِ جدًّا، مثل أشعَّةِ X.

إزاحةُ كُمبتُن $\Delta\lambda$

زيادةٌ في الطولِ الموجيِّ للفوتونِ المشتَّتِ بوساطةِ إلكترونٍ، بالنسبةِ إلى الطولِ الموجيِّ للفوتونِ الساقطِ.

مراجعةُ القسم 1-8

1. صفِ المعضلةَ المعروفةَ بنكبةِ فوقَ البنفسجيِّ. كيفَ استطاعَ بلانك حلَّ هذه المعضلةِ؟ كيفَ يختلفُ افتراضُ بلانك عن تفسيرِ الفيزياءِ التقليديَّةِ؟

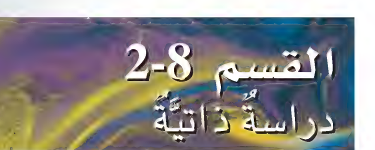
2. ما مقدارُ الطاقةِ (بوحدات eV) التي يحملُها فوتونٌ واحدٌ من ضوءٍ بنفسجيٍّ طولُه الموجيُّ 4.5×10^{-7} m؟

3. ما التأثيراتُ المتوقَّعةُ لشدَّةِ الضوءِ المشعِّ على إلكتروناتٍ تحرَّرَتْ من سطحٍ حسّاسٍ للضوءِ؟ فيمَ تختلفُ هذه التوقُّعاتُ عن الملاحظاتِ؟

4. كيفَ تفسِّرُ نظريَّةُ آينشتاين، التي تفترضُ أن الموجاتِ الكهرومغناطيسيَّةَ مكمّاةٌ، أن ما يُحدِّدُ انبعاثَ الإلكتروناتِ من سطحٍ حسّاسٍ للضوءِ هو تردُّدُ الضوءِ وليسَ شدَّتَه؟

5. يشعُّ ضوءٌ بطولٍ موجيٍّ 1.00×10^{-7} m على تنكستن ذي دالَّةِ شغلٍ تساوي 4.6 eV. هل تنبعثُ الإلكتروناتُ من التنكستن؟ إذا جرى ذلك، فما طاقتها الحركية القصوى؟

6. **تفكيرٌ ناقد:** هل عددُ الفوتوناتِ في 1 J من الضوءِ الأحمرِ (650 nm) أكبرُ من عددِ الفوتوناتِ في 1 J من الضوءِ الأزرقِ (450 nm)، أم يُساويه، أم أصغرُ منه؟ وضِّحْ ذلك.



نماذجُ الذرَّة

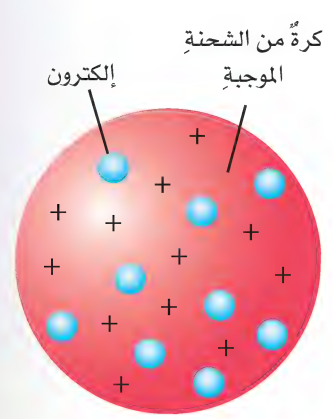
Models of the Atom

8-2 أهداف القسم

- يبيِّنُ نقاطَ القوَّةِ ونقاطَ الضعفِ لنموذجِ رَذَرفورد للذرَّة.
- يتوصَّلُ إلى أن لكلِّ عنصرٍ طيفَي انبعاثٍ وامتصاصٍ مميَّزَيْن.
- يوضِّحُ الأطيافَ الذريَّةَ مستعملاً نموذجَ بور للذرَّة.
- يفسِّرُ مخطَّطاتِ مستوى الطاقة.

النماذجُ الأولى للذرَّة

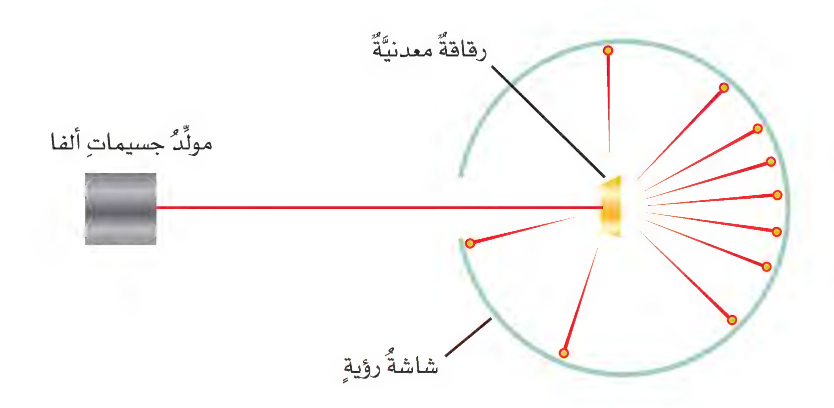
كانَ نموذجُ الذرّةِ لنيوتن كرةً صغيرةً جدًّا وصلبةً وغيرَ قابلةٍ للكسر. شكَّلَ هذا النموذجُ أساسًا جيِّدًا للنظريَّةِ الحركيَّةِ للغازاتِ. لكن، وبعدَ أن كشفتِ التجاربُ عن الطبيعةِ الكهربائيَّةِ للذرّاتِ، أصبحَ من الواجبِ تصميمُ نماذجَ جديدةٍ للذرَّةِ. فقد حفَّزَ اكتشافُ الإلكترون عامَ 1897، الفيزيائيَّ ج.ج. تومسون (1856-1940) لأن يقترحَ نموذجَهُ الجديدَ للذرَّةِ. في نموذجِ تومسون، تكونُ الإلكتروناتُ مغمورةً داخلَ حجمٍ كرويٍّ من الشحناتِ الموجبةِ كبذرِ البطيخِ الأحمرِ، كما يظهرُ في **الشكل 8-7**.



الشكل 8-7
في نموذجِ تومسون للذرَّةِ، تكونُ الإلكتروناتُ مغمورةً داخلَ نطاقٍ أكبرَ من الشحنةِ الموجبةِ كالبذرِ في البطّيخِ.

نموذجُ رَذَرفورد للذرَّة

عامَ 1911، وتحتَ إشرافِ أرنست رَذَرفورد (1871-1937)، أجرى هانز جايجر وأرنست مارسدن تجربةً مهمَّةً، لإظهارِ عدمِ صحَّةِ نموذجِ تومسون. في هذه التجربةِ، أُطلقَتْ حزمةُ شحناتٍ موجبةٍ (جسيماتِ ألفا) تتألَّفُ من بروتونَيْن ونيوترونَيْن، على رقاقةٍ معدنيَّةٍ، كما يظهرُ في **الشكل 8-8**. أظهرَتِ التجربةُ أن معظمَ جُسيماتِ ألفا قد مرَّتْ عبرَ الرقاقةِ. كما لو كانَتْ فضاءً فارغًا. بعضُ الجسيماتِ انحرفَتْ عن مسارِها الأصليِّ بزوايا كبيرةٍ جدًّا. وبعضُها ارتدَّ إلى الوراءِ. اعتُبِرَتْ هذه الانحرافاتُ غيرَ متوقَّعةٍ كليًّا، على أساسِ نموذجِ تومسون. كتبَ رَذَرفورد، «هذا ببساطةٍ أمرٌ لا يصدَّقُ، فهو من أهمِّ الأحداثِ التي جرَتْ في حياتي. إنه حدثٌ غريبٌ حقًّا، كما لو أنكَ أطلقتَ عيارًا ناريًّا على قطعةِ ورقٍ رقيقةٍ لتجدَ أن الرصاصةَ قد ارتدَّتْ عليك». انحرافاتٌ كبيرةٌ كهذه قد لا تحدثُ على أساسِ نموذجِ تومسون، ذلك أن الشحنةَ الموجبةَ موزَّعةٌ بالتساوي في كلِّ مكانٍ من الذرَّةِ، كما أن جُسيماتِ ألفا الموجبةَ والموجَّهةَ نحوَ الذرَّةِ قد لا تستطيعُ الاقترابَ كثيرًا من الشحنةِ الموزَّعةِ، بل تنحرفُ بعيدًا عنها. وقد لا يكفي التوزيعُ المتساوي لشحنةِ الذرَّةِ لكي يسبِّبَ للجسيماتِ انحرافاتٍ كبيرةً أو ارتداديَّةً.



الشكل 8-8
في هذه التجربةِ، تُطلقُ جسيماتُ ألفا الموجبةُ على رقاقةٍ معدنيَّةٍ. بما أن معظمَ جسيماتِ ألفا تمرُّ عبرَ الرقاقةِ، والقليلَ منها ينحرفُ، استنتجَ رذرفورد أن شحنةَ الذرّةِ الموجبةَ مركَّزةٌ في مركزِ الذرَّةِ.

موظِّفًا ملاحظاتِه، استنتجَ رذرفورد أن شحنةَ الذرَّةِ الموجبةَ كلَّها ومعظمَ كتلتِها تتموضعانِ في منطقةٍ صغيرةٍ بالمقارنةِ مع حجمِ الذرَّةِ. أطلقَ على هذا التركيزِ من الشحنةِ الموجبةِ والكتلةِ اسمَ *نواةِ الذرَّةِ*. ويُفترضُ أن تقعَ جميعُ إلكتروناتِ الذرَّةِ خارجَ النواةِ، في الحجمِ الكبيرِ نسبيًّا. فتبعًا لنظريةِ رذرفورد، فإن معظمَ جسيماتِ ألفا قد أخطأَتْ كلِّيًّا أنويةَ الذرَّاتِ المعدنيَّةِ، ومرَّتْ عبرَ الرقاقةِ، في حين أن القليلَ فقط منها اقتربَ من الأنويةِ بشكلٍ كافٍ لينحرفَ.


نموذجُ رذرفورد

الشكل 9-8

في نموذجِ رذرفورد، تدورُ الإلكتروناتُ حولَ النواةِ بنمطٍ شبيهٍ بدورانِ الكواكبِ حولَ الشمسِ.

نموذجُ رذرفورد والذرّاتُ غيرُ المستقرَّةِ

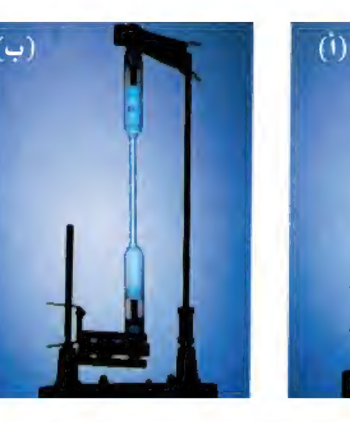
ليفسِّرَ رذرفورد عدمَ انجذابِ الإلكتروناتِ الواقعةِ في المنطقةِ الخارجيةِ للذرَّةِ، إلى النواةِ، صوّرَ الإلكتروناتِ تتحرَّكُ في مداراتٍ حولَ النواةِ، تمامًا كحركةِ الكواكبِ في مداراتِها حولَ الشمسِ، كما يظهرُ في **الشكل 9-8**.

لكنَّ الافتراضَ هذا طرحَ معضلةً خطيرةً. فإذا دارَتِ الإلكتروناتُ حولَ النواةِ، سيكونُ لها تعجيلٌ مركزيٌّ. تبعًا لنظريَّةِ ماكسويل الكهرومغناطيسيَّةِ، فإن الشحناتِ المتسارعةَ يجبُ أن تبعثَ موجاتٍ كهرومغناطيسيَّةً فتفقُدُ بذلك طاقةً. إذن، سيتناقصُ نصفُ قطرِ مدارِ الذرَّةِ بانتظامٍ، ما يؤدّي إلى تزايدٍ مطَّردٍ لتردُّدِ الإشعاعِ المنبعثِ، وانهيارٍ سريعٍ للذرَّةِ، عندَ غوصِ الإلكتروناتِ إلى داخلِ النواةِ. في الحقيقةِ، أظهرَتِ الحساباتُ أنه تبعًا لهذا النموذجِ، تنهارُ الذرَّةُ خلالَ جزءٍ من بليونٍ من الثانيةِ تقريبًا. هذه المعضلةُ في نموذجِ رذرفورد دفعَتِ العلماءَ إلى متابعةِ البحثِ عن نموذجٍ جديدٍ للذرَّةِ.

الأطيافُ الذرّيَّةُ

أجابَ نموذجُ رذرفورد على كثيرٍ من التساؤلاتِ. أَمِلَ العلماءُ بالتوصُّلِ إلى نموذجٍ جديدٍ للذرَّةِ، يفسِّرُ حقيقةً غامضةً أخرى عن الغازاتِ. لدى ملءِ أنبوبٍ زجاجيٍّ فارغٍ بغازٍ ذرّيٍّ نقيٍّ، وتطبيقِ فرقِ جُهدٍ عالٍ بينَ إلكترودَيْن معدنيَّيْن في الأنبوبِ، يتولَّدُ تيّارٌ في الغازِ، ويُطلقُ الأنبوبُ ضوءًا، كما يظهرُ في **الشكل 10-8**. يُعدُّ لونُ الضوءِ خاصّيَّةً للغازِ في الأنبوبِ. هكذا تعملُ لوحاتُ النيونِ الإعلانيَّةُ. وما تعدُّدُ الألوانِ التي نراها في لوحاتِ النيونِ سوى نتيجةٍ للضوءِ الذي تطلقُهُ غازاتٌ مختلفةٌ في الأنابيبِ.

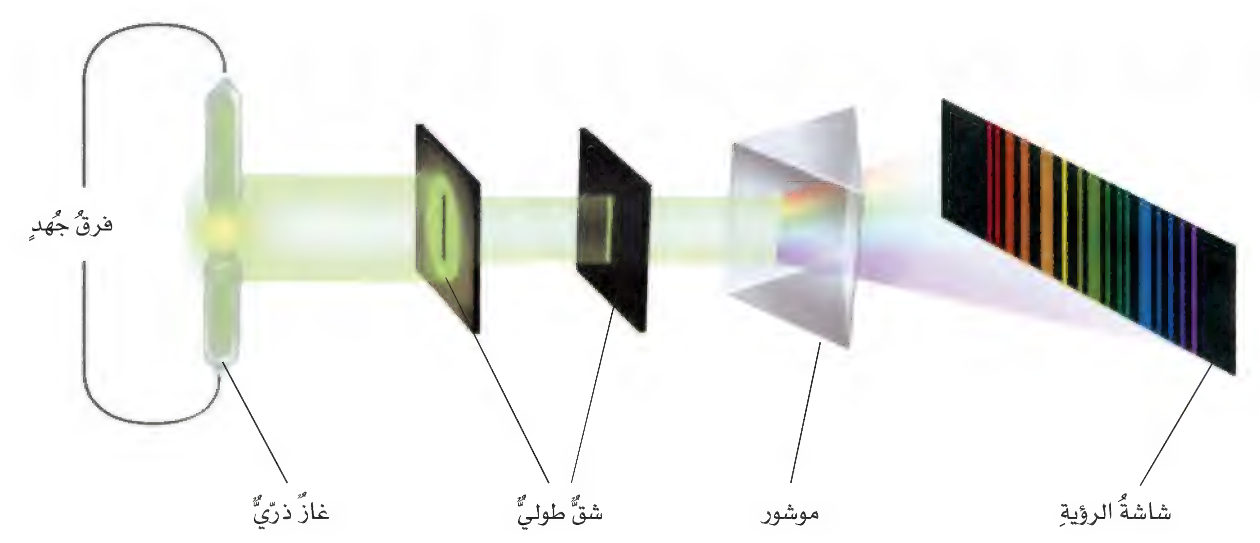
(أ)






الشكل 10-8

لدى تطبيقِ فرقِ جُهدٍ بينَ طرفَي أنبوبٍ يحتوي على غازٍ ذرّيٍّ، الهيدروجين (أ)، والزئبق (ب) والنيتروجين (ج)، يشعُّ الغازُ. يعتمدُ لونُ الإشعاعِ على نوعِ الغازِ.



الشكل 8-11

لدى مرورِ الضوءِ من غازٍ ذرّيٍّ عبرَ موشورٍ، يظهرُ الضوءُ المشتَّتُ كسلسلةٍ من خطوطٍ طيفيَّةٍ منفصلةٍ ناصعةٍ.

طيفٌ انبعاثيٌّ وطيفٌ امتصاصيٌّ مميَّزانِ لكلِّ غازٍ

عندَما يمرُّ الضوءُ المنبعثُ بوساطةِ غازٍ ذرّيٍّ عبرَ موشورٍ، كما يظهرُ في **الشكل 8-11**، ترى سلسلةً من خطوطٍ ناصعةٍ منفصلةٍ. يُقابلُ كلَّ خطٍّ طولٌ موجيٌّ مختلفٌ، أو لونٌ أو ضوءٌ. تسمّى هذه السلسلةُ من الخطوطِ **طيفَ الانبعاثِ** emission spectrum.

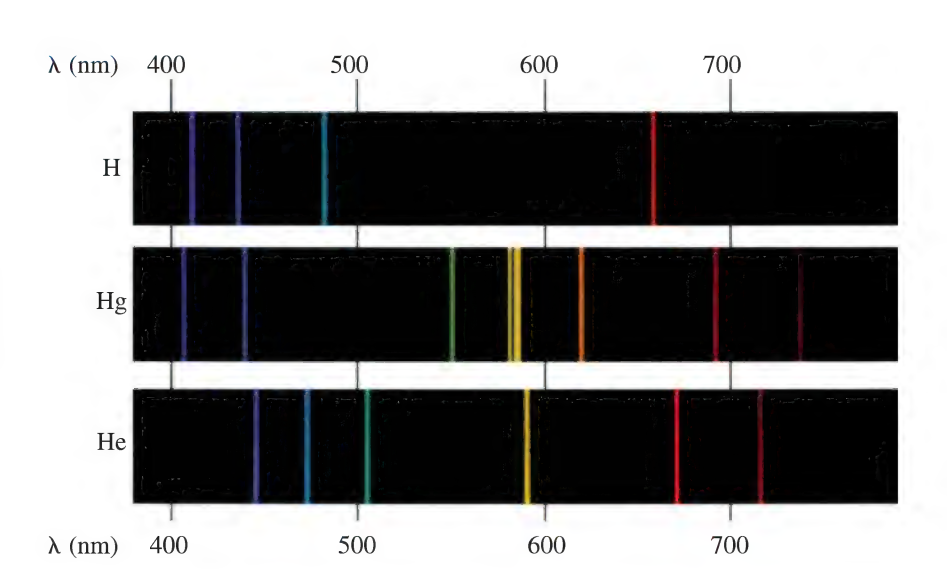
يبيِّنُ **الشكلُ 8-12** أن لكلٍّ من الهيدروجينِ والزئبقِ والهيليوم أطيافَ انبعاثٍ مميِّزةً. والمزيدُ من التحليلِ لموادَّ أخرى يكشفُ أن لكلِّ عنصرٍ طيفَ انبعاثٍ أيضًا محدَّدًا ومميَّزًا. بمعنى آخرَ، تشكِّلُ الأطوالُ الموجيَّةُ الموجودةُ في طيفٍ معيَّن خاصّيَّةً للعُنصرِ المشعِّ للضوءِ. وبما أن من غيرِ الممكنِ لعنصرَيْن أن يبعثا الطيفَ الخطّيَّ نفسَه، فيصبحُ بالإمكانِ استعمالُ المطيافيَّةِ (علمِ الطيفِ) لتعرُّفِ عناصرَ في خليطٍ.

هل تعلم؟

لدى البدءِ بدراسةِ الطيفِ الشمسيِّ، اكتُشفَتْ خطوطٌ طيفيَّةٌ لا تتوافقُ مع أيِّ عنصرٍ معروفٍ، ما أدّى إلى استحداثِ عنصرٍ جديدٍ. وبما أن *هيليوس* في اليونانيةِ مرادفُ كلمةِ الشمسِ، سُمِّيَ العنصرُ الجديدُ هيليوم.

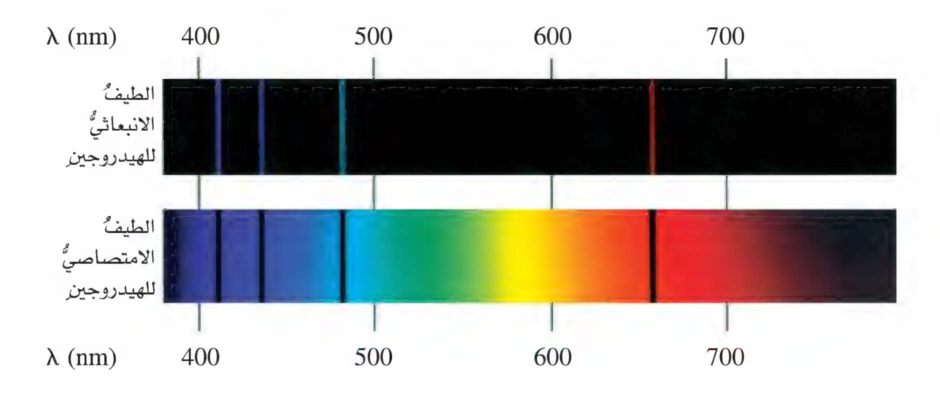
طيفُ الانبعاثِ

خطوطٌ ملوَّنةٌ تُشيرُ إلى الأطوالِ الموجيَّةِ للطاقةِ المشعَّةِ والمنبعثةِ من مادَّةٍ.



الشكل 8-12

لكلِّ غازٍ من هيدروجينٍ وزئبقٍ وهيليوم، طيفُ انبعاثٍ مميِّزٌ.



الشكل 8-13

تحدثُ خطوطُ الامتصاصِ السوداءُ للهيدروجين بالأطوالِ الموجيَّةِ نفسِها لخطوطِ الانبعاثِ الناصعة.

طيفُ الامتصاص

خطوطٌ سوداءُ تشيرُ إلى الأطوالِ الموجيَّةِ للطاقةِ التي تمتصُّها المادَّةَ.

بالإضافةِ إلى انبعاثِ ضوءٍ بأطوالٍ موجيَّةٍ محدَّدةٍ، يستطيعُ العنصرُ امتصاصَ الضوءِ عندَ أطوالٍ موجيَّةٍ محدَّدةٍ. تُسمّى الخطوطُ الطيفيَّةُ المتوافقةُ مع هذه العمليَّةِ **طيفَ الامتصاص** absorption spectrum.

يمكنُ رؤيةُ طيفِ الامتصاصِ بتمريرِ ضوءٍ يحتوي على جميعِ الأطوالِ الموجيَّةِ عبرَ بُخارِ العنصرِ المطلوبِ تحليلُه. يتألَّفُ طيفُ الامتصاصِ من سلسلةِ خطوطٍ سوداءَ، وضعَتْ فوقَ طيفٍ متَّصل.

يتطابقُ كلُّ خطٍّ في طيفِ الامتصاصِ لعنصرٍ معيَّنٍ، مع خطٍّ في طيفِ الانبعاثِ لذاك العنصرِ، كما يظهرُ في **الشكل 8-13** للهيدروجين. عندَ التطبيقِ، تظهرُ عادةً خطوطُ انبعاثٍ أكثرَ من خطوطِ الامتصاص. أما سببُ ذلك فيُبحثُ لاحقًا.

لطيفِ الامتصاصِ عدَّةُ تطبيقاتٍ عمليَّةٍ. الطيفُ المستمرُّ للإشعاعِ المنبعثِ من الشمسِ، مثلاً، يجبُ أن يمرَّ خلالَ الغازاتِ الأبردِ لغلافِ الجوِّ الشمسيِّ، وبعدَها عبرَ غلافِ الأرض. لقد استُحدثَتْ خطوطُ الامتصاصِ المتعدِّدةُ والظاهرةُ في الطيفِ الشمسيِّ لتعرُّفِ العناصرِ في غلافِ الجوِّ الشمسيِّ. وقد تمكَّنَ العلماءُ أيضًا من فحصِ الضوءِ القادمِ من النجومِ، ما عدا شمسَنا، بالطريقةِ نفسِها. فاستطاعَ علماءُ الفضاءِ من خلالِ دقَّةِ الملاحظةِ والتحليلِ، تحديدَ النسبِ لعناصرَ مختلفةٍ موجودةٍ في النجوم.

وبالعودةِ إلى التاريخِ، فقد شكَّلَ حدوثُ الأطيافِ الذرّيَّةِ محطَّةً مهمَّةً للعلماءِ، ليحاولوا إيجادَ نموذجٍ جديدٍ للذرَّةِ. وبقيَ السببُ الكامنُ وراءَ هذه الأطيافِ، لفترةٍ طويلةٍ بعدَ اكتشافِها، غامضًا. ولم يكنْ في نموذجِ رذرفورد الكوكبيِّ ما يفسِّرُ الحقيقةَ التاليةَ: لكلِّ عنصرٍ سلسلةٌ خاصةٌ ومميِّزةٌ من خطوطِ الطيفِ. بالرغمِ من ذلك، فإن آمالَ العلماءِ ظلَّتْ معلَّقةً بنموذجٍ جديدٍ للذرَّةِ، يفسِّرُ هذه الظاهرة.

نشاط عملي سريع

الأطيافُ الذرّيَّةُ

الموادّ

- ✓ محزوزُ حيودٍ (موشور)
- ✓ مصادرُ ضوءٍ متعدِّدةٌ، مثلُ:
  - مصباحِ ضوءٍ فلوريٍّ
  - مصباحِ ضوءٍ متموِّجٍ
  - مصباحِ مربى مائيٍّ صافٍ
  - مصباحِ غبارِ الصوديوم
  - مصباحِ نادٍ رياضيٍّ
  - مصباحِ نيون

إرشاداتُ السلامة

تنبَّهْ إلى فروقِ الجُهدِ العاليةِ قربَ بعضِ مصادرِ الضوءِ هذه.

تنتجُ أنواعٌ معيَّنةٌ من مصادرِ الضوءِ طيفًا متَّصلاً، عندَ النظرِ إليها من خلالِ محزوزِ الحيودِ، بينما تنتجُ أنواعٌ أخرى خطوطًا منفصلةً. انظرْ إلى تشكيلةٍ من مصادرِ ضوءٍ مختلفةٍ، وقارنْ نتائجَك. حاولْ أن تجدَ مثالاً واحدًا على الأقلِّ لطيفٍ متَّصلٍ وبضعةَ أمثلةٍ على خطوطٍ منفصلةٍ.

نموذجُ بور لذرَّةِ الهيدروجين

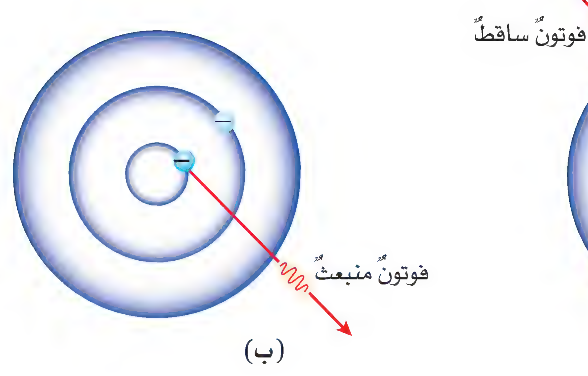
عامَ 1913، قدَّمَ الفيزيائيُّ الدانمركيُّ نيلز بور (1885-1962) نموذجًا جديدًا لذرَّةِ الهيدروجين، تفسِّرُ الأطيافَ الذرّيَّةَ. يتضمَّنُ نموذجُ بور بعضَ الجوانبِ التقليديَّةِ، وبعضَ المبادئِ الجريئةِ التي لم تستطعِ الفيزياءُ التقليديَّةُ تفسيرَها.

نموذجُ بور يشبهُ نموذجَ رذرفورد في أن الإلكترونَ يتحرَّكُ حولَ النواةِ بمداراتٍ دائريَّةٍ. والقوَّةُ التي تمسكُ بالإلكترون في مدارِه هي القوَّةُ الكهربائيَّةُ بينَ البروتون الموجبِ داخلَ النواةِ والإلكترونِ السالبِ. لكن في نموذجِ بور يُسمحُ بمداراتٍ معيَّنةٍ فقط، ولا مكانَ للإلكترونِ أبدًا بينَ هذه المداراتِ. عوضًا عن ذلك، يُقال إن الإلكترون يقفزُ لحظيًّا من مدارٍ إلى آخرَ، دون أن يكونَ موجودًا على الإطلاقِ بين المداراتِ.

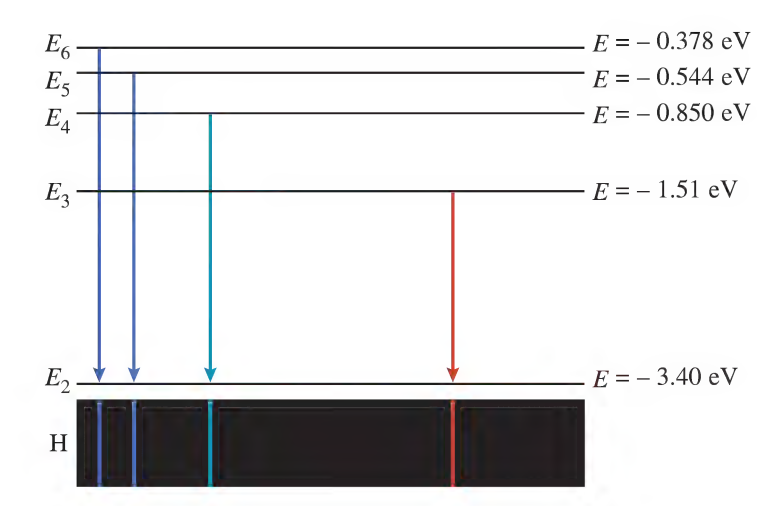
يحيدُ نموذجُ بور أكثرَ عن الفيزياءِ التقليديَّةِ، بافتراضِه أن ذرّةَ الهيدروجين لا تبعثُ طاقةً بشكلِ إشعاعٍ، عندَ وجودِ الإلكترونِ في أيٍّ من هذه المداراتِ المخصَّصةِ. هذا يعني أن الطاقةَ الكلّيَّةَ للذرَّةِ تبقى ثابتةً، وهذا ما يشكِّلُ حلاًّ لإحدى صعوباتِ نموذجِ رذرفورد (عدم استقراريَّةِ الذرَّةِ). يعتقدُ بور أن الإلكترونَ، عوضَ أن يشعَّ طاقةً بشكلٍ متَّصلٍ، فإنه يُطلقُ طاقةً فقط عندَما يقفزُ من مدارٍ خارجيٍّ إلى مدارٍ داخليٍّ. وتردُّدُ الإشعاعِ المنبعثِ في هذه القفزةِ يرتبطُ بتغيُّرِ طاقةِ الذرَّةِ. بما أن طاقةَ الفوتونِ المنبعثةَ (E) تساوي مقدارَ النقصِ في طاقةِ الذرَّةِ، فإن حسابَ تردُّدِ الإشعاعِ المنبعثِ يصبحُ ممكنًا بوساطةِ معادلةِ بلانك التاليةِ:

$$E = E_{\text{ابتدائي}} - E_{\text{نهائي}} = hf$$

إن مستوى الطاقةِ الأدنى في نموذجِ بور، والذي يقابلُ أصغرَ نصفِ قطرٍ محتملٍ يُسمّى، عادةً، *الحالةَ الدنيا* (حالةَ الاستقرارِ)، ويُسمّى نصفُ قطرِ هذا المدارِ *نصفَ قطرِ بور*. تكونُ معظمُ الإلكتروناتِ، عندَ درجةِ حرارةٍ عاديَّةٍ، في حالةِ استقرارٍ. حيثُ يكونُ الإلكترونُ قريبًا نسبيًّا من النواةِ. عندَما يشعُّ ضوءٌ بطيفٍ متَّصلٍ على الذرَّةِ، يمكنُ للذرَّةِ أن تمتصَّ فقط الفوتوناتِ ذاتَ الطاقةِ (hf)، والتي تُطابقُ طاقةَ الفرقِ بينَ مستويَيْنِ. عندَما يحدثُ ذلك، يقفزُ إلكترونٌ من مستوى طاقةٍ أدنى إلى مستوى طاقةٍ أعلى، يقابلُ مدارًا أبعدَ عن النواةِ، كما يظهرُ في **الشكلِ 8-14** (أ). تُسمّى هذه الحالةُ *الحالةَ المثارةَ*. تفسِّرُ الفوتوناتُ الممتصَّةُ الخطوطَ المظلمةَ في طيفِ الامتصاصِ.



الشكل 8-14
(أ) عندَما تمتصُّ ذرَّةٌ فوتونًا، يقفزُ إلكترونٌ إلى مستوى طاقةٍ أعلى. (ب) عندَما يسقطُ إلكترونٌ إلى مستوى طاقةٍ أدنى، تطلقُ الذرَّةُ فوتونًا.



الشكل 8-15
كلُّ قفزةٍ من مستوى طاقةٍ إلى مستوًى آخرَ، يقابلُه خطٌّ طيفيٌّ محدَّدٌ. يوضِّحُ هذا المثالُ الانتقالَ في خطوطِ طيفِ الهيدروجين المرئيَّةِ. المستوى الأدنى للطاقةِ، E_1، لا يظهرُ في الشكلِ.

عندَما يكونُ إلكترونٌ في حالةٍ مُثارةٍ، يُحتمل أن يقفزَ الإلكترونُ رجوعًا إلى مستوى طاقةٍ أدنى، بإطلاقِهِ فوتونًا، كما يظهرُ في **الشكل 8-14** (ب). تُسمّى هذه الطريقةُ *الانبعاثَ التلقائيَّ*، وتُعدُّ الفوتوناتُ المنبعثةُ مسؤولةً عن الخطوطِ الناصعةِ في طيفِ الانبعاثِ.

في الحالتَيْن، توجدُ صلةٌ بين مقدارِ قفزةِ الإلكترونِ وطاقةِ الفوتونِ. مثلاً، يستطيعُ إلكترونٌ في المستوى الرابعِ للطاقةِ أن يقفزَ إلى المستوى الثالثِ أو الثاني، أو مستوى الاستقرارِ. بما أن معادلةَ بلانك تعطي الطاقةَ من مستوًى إلى المستوى التالي، فإن قفزةً كبيرةً تعني انبعاثَ كمّيّةٍ أكبرَ من الطاقةِ. فالقفزاتُ بينَ مستوياتٍ مختلفةٍ تقابلُها إذن خطوطُ طيفٍ مختلفةٌ ومرصودةٌ.

يُظهرُ **الشكلُ 8-15** الخطوطَ الطيفيَّةَ الأربعةَ في الطيفِ المرئيِّ للهيدروجين. وقد نجحَتْ حساباتُ بور في تعليلِ الأطوالِ الموجيَّةِ لجميعِ خطوطِ الهيدروجين الطيفيَّةِ.

أشرْنا من قبلُ إلى أن خطوطَ امتصاصٍ أقلَّ من خطوطِ الانبعاثِ تُرصدُ فعليًّا. والسببُ هو أن أطيافَ الامتصاصِ تُلاحظُ عادةً عندَما يكونُ الغازُ عندَ درجةِ حرارةِ الغرفةِ. إذن تكونُ معظمُ الإلكتروناتِ في حالةِ استقرارٍ، وبالتالي تكونُ جميعُ الانتقالاتِ

الفيزياءُ والحياة

1. **مصباحُ نيون** لدى تطبيقِ فرقِ جُهدٍ بينَ إلكترودَيْن على طرفَيْ أنبوبٍ يحتوي على نيون، كمصباحِ نيون أو لوحةِ إعلاناتٍ، يتوهَّجُ النيون. هل يكونُ الضوءُ المنبعث من اللوحةِ مؤلَّفًا من طيفٍ متَّصلٍ أم من بضعةِ خطوطٍ فقط؟ عللْ إجابتَك.
2. **مستوياتُ الطاقةِ** إذا كانَ لذرَّةٍ معيَّنةٍ أربعةُ مستوياتِ طاقةٍ محتملةٍ، وكانَ باستطاعةِ إلكترونٍ القفزُ بينَ أي مستويَيْن للطاقةِ في الذرَّةِ، فما عددُ خطوطِ الطيفِ المختلفةِ التي قد تنبعثُ؟
3. **تعرُّفُ الغازاتِ** ليسَ النيون النوعَ الوحيدَ للغازِ المستعملَ في لوحاتِ النيون. تعلمُ أن هناكَ الكثيرَ من الغازاتِ ذاتِ التأثيراتِ المشابهةِ لدى تعرُّضِها لفرقِ جُهدٍ. قد تكونُ الألوانُ الملاحظةُ مختلفةً بعضَ الأحيانِ، لكنَّ غازًا معيَّنًا يتوهَّجُ دائمًا باللونِ نفسِه. كيف تستطيعُ التمييزَ بين غازَيْن من هذا النوعِ؟

الملحوظةِ من مستوى معيَّن (E_1) إلى مستوياتٍ أعلى. على الجهةِ الأخرى، تُرصدُ أطيافُ الانبعاثِ برفعِ درجةِ حرارةِ غازٍ إلى درجةٍ مرتفعةٍ، ومُراقبةِ الانتقالاتِ إلى أسفلَ بين أيِّ مستويَيْن. في هذه الحالةِ، تكونُ جميعُ الانتقالاتِ محتملةً، وبالتالي يظهرُ المزيدُ من الخطوطِ الطيفيَّةِ.

قدَّمَتْ فكرةُ بور، حولَ قفزةِ الكمِّ بينَ مستوياتِ الطاقةِ، تفسيرًا لظاهرةِ الشفقِ الشماليِّ (الأضواءِ القطبيَّةِ الشماليَّةِ). جسيماتٌ مشحونةٌ من الشمس تُحبسُ، في بعضِ الأحيان، داخلَ المجالِ المغناطيسيِّ للأرض، وتترسَّبُ حولَ القطبَيْن الشماليِّ والجنوبيِّ المغناطيسيَّين. الأضواءُ التي تظهرُ في خطوطِ العرضِ الجنوبيَّةِ تُسمّى *الشفقَ الجنوبيَّ* (الأضواءَ القطبيَّةَ الجنوبيَّةَ). عندما تترسَّبُ هذه الجسيماتُ المشحونةُ من الشمس، تصطدمُ بإلكتروناتِ الذرّات في مجالِنا الجوّيِّ، وتنقلُ الطاقةَ إلى هذهِ الإلكتروناتِ، ما يجعلُها تقفزُ إلى مستوياتِ طاقةٍ أعلى. وعندما يعودُ إلكترونٌ إلى مدارِه الأصليِّ، تُطلقُ الطاقةُ الزائدةُ بشكلِ فوتونٍ. تنشأُ الأضواءُ القطبيَّةُ الشماليَّةُ نتيجةَ البلايينِ من قفزاتِ الكمِّ هذه، التي تتمُّ في الوقتِ نفسِه.

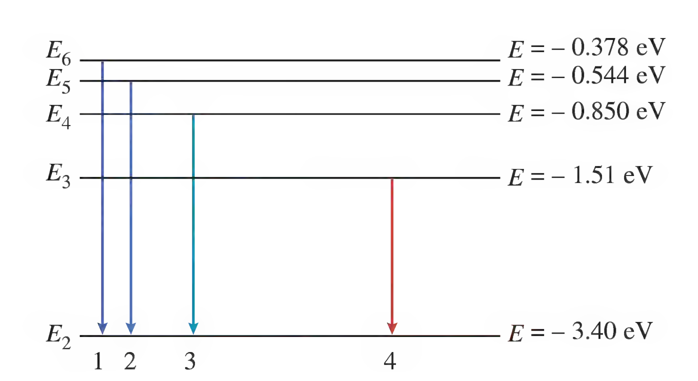
تتَّحدُ ألوانُ الشفقِ الشماليِّ تبعًا لنوعِ الغازاتِ في الجوِّ. الجسيماتُ المشحونةُ من الشمسِ هي في معظمِها جسيماتٌ أُطلقَتْ من المجالِ المغناطيسيِّ للأرضِ إلى داخلِ جزءٍ من الجوِّ يحتوي على غازِ الأكسجين. يُطلقُ الأكسجينُ الضوءَ الأخضرَ. لذلك يكونُ الضوءُ الأخضرُ هو اللونُ الغالبُ على الشفقِ الشماليِّ. أما الأضواءُ الحمراءُ فهي نتيجةُ التصادماتِ مع ذرّاتِ النيتروجين. بما أن كلَّ نوعٍ من الغازِ يُطلقُ لونًا فريدًا، فالأضواءُ القطبيَّةُ الشماليَّةُ تحتوي فقط على بضعةِ ألوانٍ محدَّدةٍ ومنفصلةٍ ولا تشكِّلُ طيفًا متَّصلاً.

مثال 8 (ج)

تفسيرُ مخطَّطاتِ مستوى الطاقةِ

المسألة

يسقطُ إلكترونٌ في ذرَّةِ هيدروجينٍ من مستوى طاقةٍ E_4 إلى مستوى طاقةٍ E_2. ما تردُّدُ الفوتونِ المنبعثِ؟ وأيُّ الخطوطِ في الطيفِ الانبعاثيِّ يطابقُ هذه الحالةَ؟



الحــلّ

1. **أجدُ طاقةَ الفوتونِ.**

تساوي طاقةُ الفوتونِ التغيُّرَ في طاقةِ الإلكترونِ. E_4 هي مستوى الطاقةِ الابتدائيُّ للإلكترونِ، و E_2 مستوى الطاقةِ النهائيُّ. توظيفُ القيمِ من المخطَّطِ أعلاه يعطي التاليَ:

$$E = E_{\text{ابتدائي}} - E_{\text{نهائي}}$$

$$E = (-0.850 \text{ eV}) - (-3.40 \text{ eV}) = 2.55 \text{ eV}$$



لاحظْ أن طاقاتِ مستوياتِ الطاقةِ سالبةٌ. سببُ ذلك تعريفُ طاقةِ إلكترونٍ في ذرَّةٍ بدلالةِ كمّيَّةِ الشغلِ المطلوبةِ لنزعِ إلكترونٍ من الذرَّةِ. في بعضِ مخطَّطاتِ مستوى الطاقةِ، تُعطى الطاقةُ E_1 القيمةَ صفرًا، وتكونُ مستوياتُ الطاقةِ العليا موجبةً. عمومًا، يكونُ الفرقُ بين مستوى طاقةٍ عالٍ ومستوى طاقةٍ أدنى موجبًا دائمًا، مشيرًا إلى أن الإلكتروناتِ تفقدُ الطاقةَ لدى سقوطِها إلى مستوى أدنى.

2. **أستعملُ معادلةَ بلانك لإيجادِ الترددِ.**

$$E = hf$$

$$f = \frac{E}{h} = \frac{(2.55 \text{ eV})(1.60 \times 10^{-19} \text{ J/eV})}{6.63 \times 10^{-34} \text{ J·s}}$$

$$\boxed{f = 6.15 \times 10^{14} \text{ Hz}}$$



لاحظِ التحويلَ من eV إلى J كي تُختزلَ الوحداتُ بشكلٍ سليمٍ.

3. **أجدُ الخطَّ الذي يتوافقُ مع طيفِ الانبعاثِ.**

إن تفحُّصًا للمخطَّطِ يُظهرُ أن قفزةَ الإلكترونِ من E_4 إلى E_2 تتوافقُ مع الخطِّ 3 في طيفِ الانبعاثِ. (يمكن الاستفادة من جدول نطاقات الطيف الكهرومغناطيسي الموجودة في ملحق (د) في قسم الملاحق).

4. **أقيِّم**

يقعُ الخطُّ 3 في الجزءِ المرئيِّ للطيفِ الكهرومغناطيسيِّ، ويظهرُ أنه أزرقُ. يقعُ الترددُ $f = 6.15 \times 10^{14}$ Hz ضمنَ نطاقِ الطيفِ المرئيِّ وفي اتِّجاهِ الطرفِ البنفسجيِّ. من المعقولِ إذن أن يكونَ هذا الترددُ أزرقَ.

تطبيق 8 (ج)

تفسيرُ مخطَّطاتِ مستوى الطاقةِ

1. يسقطُ إلكترونٌ في ذرَّةِ هيدروجينٍ من مستوى طاقةٍ E_3 إلى E_2. ما تردُّدُ الفوتونِ المنبعثِ؟ وأيُّ الخطوطِ في طيفِ الانبعاثِ في **المثال** 8 (ج) يتوافقُ مع هذه الحالةِ؟

2. يسقطُ إلكترونٌ في ذرَّةِ هيدروجينٍ من مستوى طاقةٍ E_6 إلى E_3. ما تردُّدُ الفوتونِ المنبعثِ؟ وفي أيِّ نطاقٍ من الطيفِ الكهرومغناطيسيِّ يقعُ هذا الفوتون؟ (انظرِ الجدولَ لنطاقاتِ الطيفِ الكهرومغناطيسيِّ في الملحق د).

3. يُظهرُ مخطَّطُ مستوى الطاقةِ في **الشكل 8-16** المستوياتِ الخمسةَ الأولى للطاقةِ لبخارِ الزئبقِ. يُعطى المستوى E_1 القيمةَ صفرًا. ما تردُّدُ الفوتونِ المنبعثِ عندَما يسقطُ إلكترونٌ من مستوى E_3 إلى E_2 في ذرَّةِ الزئبقِ؟

E_5	$E = 6.67$ eV
E_4	$E = 5.43$ eV
E_3	$E = 4.86$ eV
E_2	$E = 4.66$ eV
E_1	$E = 0$ eV

الشكل 8-16

4. ما العددُ المحتملُ لخطوطِ الطيفِ المختلفةِ المنبعثةِ، إذا استُثيرَ بخارُ زئبقٍ بوساطةِ فوتوناتٍ تحملُ 6.67 eV من الطاقةِ؟ (ملاحظةٌ: باستطاعةِ إلكترونٍ أن ينتقلَ، مثلاً، من مستوى E_5 إلى E_3، ثم من E_3 إلى E_2، ثم من E_2 إلى E_1).

5. يوجدُ في الطيفِ الانبعاثيِّ لذرَّةِ الهيدروجينِ خطٌّ انبعاثيٌّ واحدٌ تردُّدُه 7.29×10^{14} Hz. جدْ مستويَي الطاقةِ اللذَيْن يجبُ أن تقفزَ بينَهما إلكتروناتٌ لتطلقَ هذا الخطَّ، وحدِّدِ الخطَّ في مخطَّطِ مستوى الطاقةِ في **المثال 8** (ج). (ملاحظةٌ: جدْ، أوَّلاً، طاقةَ الفوتوناتِ، ثم استعملْ مخطَّطَ مستوى الطاقةِ.)

نموذجُ بور نموذجٌ غيرُ مكتمل

شكَّلَ نموذجُ بور، في بعضِ جوانبِه، نجاحًا باهرًا، لأنه استطاعَ تفسيرَ سماتٍ كثيرةٍ لأطيافِ الهيدروجين، كانَتْ عصيَّةً عن التفسيرِ من قبلُ. فقد اشتقَّ النموذجُ تعبيرًا لشعاعِ الذرَّةِ، وتوقَّعَ مستوياتِ الطاقةِ للهيدروجين. وأثبَتَ نجاحَهُ أيضًا عندَما جرى تطبيقُه على ذرّاتٍ شبيهةٍ بالهيدروجين، أي الذرّاتِ ذاتِ الإلكترونِ الواحدِ. لكن رغمَ محاولاتٍ عدَّةٍ لتوسيعِ نطاقِ تطبيقِ هذا النموذجِ على ذرّاتٍ متعدِّدةِ الإلكترونات، فإن النتائجَ لم تكن ناجحةً.

أثارَ نموذجُ بور للذرَّةِ أسئلةً جديدةً أيضًا. فمثلاً، افترضَ بور أن الإلكتروناتِ لا تشعُّ طاقةً عندَما تكونُ في مدارٍ مستقرٍّ، لكنَّ النموذجَ لم يستطعْ تبريرَ ذلك. مشكلةٌ أخرى نشأَتْ عن عدمِ إمكانيَّةِ النموذجِ أن يفسِّرَ وجودَ مداراتٍ مستقرَّةٍ دائمةٍ للإلكترونات، وغيابَ مداراتٍ أخرى.

أخيرًا، اتَّبعَ النموذجُ الفيزياءَ التقليديَّةَ في جوانبَ معيَّنةٍ، لكنّه اختلفَ عنها جذريًّا في جوانبَ أخرى. لهذهِ الأسبابِ مجتمعةً، لم يشكِّلْ نموذجُ بور صورةً كاملةً لبنيةِ الذرَّةِ. ولا يزالُ العلماءُ يبحثونَ عن نموذجٍ جديدٍ يستطيعَ تخطّي تلك الصعوباتِ.

مراجعةُ القسم 8-2

1. موظِّفًا نموذجَ تومسون للذرَّةِ، ماذا توقَّعَ رَذَرفورد أن يحدثَ لدَى إطلاقِه جسيماتِ ألفا الموجبةَ على رقاقةٍ معدنيَّةٍ؟

2. لماذا استنتجَ رذرفورد أن الشحنةَ الموجبةَ للذرَّةِ ومعظمَ كتلةِ الذرَّةِ مُركَّزتانِ في مركزِها؟

3. ما مشكلتا نموذجِ رذرفورد للذرَّةِ؟

4. كيف يمكنُ استعمالُ الأطيافِ الذرّيَّةِ للغازاتِ، لتعرُّفِ العناصرِ الموجودةِ في النجومِ البعيدةِ؟

5. اتَّبعَ نموذجُ بور في بعضِ جوانبِه الفيزياءَ التقليديَّةَ، بينما اتَّبعَتْ ميكانيكا الكمِّ غيرَ ذلك. ما الذي يتوافقُ مع ميكانيكا الكمِّ؟

6. كيف استطاعَ نموذجُ بور تفسيرَ طيفَي الانبعاثِ والامتصاصِ لعُنصرٍ معيَّنٍ؟

7. **تفكيرٌ ناقد:** استطاعَ أحدُ علماءِ النرويج تحديدَ أطوالٍ موجيَّةٍ مختلفةٍ، تشكِّلُ جزءًا من الشفقِ الشماليِّ. فقد تبيَّنَ له وجودُ بضعةِ أطوالٍ موجيَّةٍ في الأضواءِ فقط، وليسَ الطيفَ المتَّصلَ. كيف يُفسِّرُ نموذجُ بور للذرَّةِ هذه الظاهرةَ؟

ملخّصُ الفصل 8

أفكارٌ أساسيَّة

القسم 8-1 تكمّي الطاقةِ

- إشعاعُ الجسمِ الأسودِ والتأثيرُ الكهروضوئيُّ يناقضانِ الفيزياءَ التقليديَّة. لكن يمكنُ تفسيرُهما بافتراضِ أن الطاقةَ تأتي بوحداتٍ منفصلةٍ أو أنها مكمّاةٌ.
- تعتمدُ طاقةُ كمٍّ ضوئيٍّ أو فوتونٍ على تردُّدِ الضوءِ. تحديدًا، تساوي طاقةُ الفوتونِ التردُّدَ مضروبًا في ثابتِ بلانك.
- ثابتُ بلانك يساوي تقريبًا 6.63×10^{-34} J•s.
- العلاقةُ بين الـ eV والـ J هي كالتالي: $1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19}$ J.
- أدنى طاقةٍ يحتاجُ إليها الإلكترونُ للإفلاتِ من المعدن، تعتمدُ على تردُّدِ العتبةِ للمعدن.
- أقصى طاقةٍ حركيةٍ للإلكتروناتِ الضوئيَّةِ تعتمدُ على دالَّةِ الشغلِ، وتردُّدِ الضوءِ المشعِّ على المعدن.

القسم 8-2 نماذجُ الذرَّةِ

- تجربةُ رذرفورد تبيِّنُ أن شحنةَ الذرَّةِ الموجبةَ كلَّها ومعظمَ كتلةِ الذرَّةِ مُتركِّزتانِ في مركزِ الذرَّةِ.
- لكلِّ غازٍ طيفانِ مميّزانِ انبعاثيٌّ وامتصاصيٌّ.
- فُسِّرتِ الأطيافُ الذريَّةُ بوساطةِ نموذجِ بور للذرَّةِ، حيثُ تنتقلُ الإلكتروناتُ من مستوى طاقةٍ إلى آخرَ، عندَما تمتصُّ فوتوناتٍ أو تبعثُ فوتوناتٍ.

مصطلحاتٌ أساسيَّة

إشعاعُ الجسمِ الأسودِ
Blackbody radiation (ص 224)

نكبةُ فوقَ البنفسجيِّ
Ultraviolet catastrophe (ص 225)

التأثيرُ الكهروضوئيُّ
Photoelectric effect (ص 228)

الفوتون Photon (ص 229)

دالَّةُ الشغل Work function (ص 229)

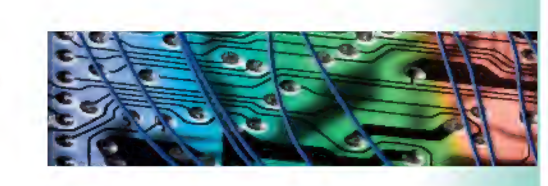
إزاحةُ كُمبتُن Compton shift (ص 232)

طيفُ الانبعاث
Emission spectrum (ص 235)

طيفُ الامتصاص
Absorption spectrum (ص 236)

رموزُ المتغيِّراتِ

الكمّيَّة	الرمز	الوحدة
طاقةُ فوتونٍ	E	J
تردُّدُ العتبةِ	f_o	Hz
دالَّةُ الشغلِ	hf_o	eV و J
الطاقةُ الحركيةِ القصوى	KE_m	eV و J



مراجعةُ الفصل 8

راجعْ وقيِّمْ

تكمّي الطاقةِ

أسئلةُ مراجعة

1. لماذا يُستعملُ تعبيرُ نكبةِ فوقَ *البنفسجيِّ* لوصفِ الاختلافِ بينَ توقُّعاتِ الفيزياءِ التقليديَّةِ والبياناتِ المختبريَّةِ لإشعاعِ الجسمِ الأسودِ؟
2. ماذا يعني تعبيرُ «الكمّ»؟
3. ماذا افترضَ بلانك كي يفسِّرَ البياناتِ المختبريَّةَ لإشعاعِ الجسمِ الأسودِ؟ كيف يتناقضُ افتراضُ بلانك مع الفيزياءِ التقليديَّةِ؟
4. ما العلاقةُ بينَ الجول والـ eV؟
5. كيفَ تتعارضُ ملاحظاتُ التأثيرِ الكهروضوئيِّ مع توقُّعاتِ الفيزياءِ التقليديَّةِ؟
6. ماذا توضِّحُ إزاحةُ كُمبتُن؟

أسئلةٌ حولَ المفاهيم

7. أيُّ الفوتونَيْن له طاقةٌ أكبرُ: فوتونٌ من إشعاعٍ فوقَ بنفسجيٍّ أم فوتونٌ من الضوءِ الأصفرِ؟
8. إذا لاحظْتَ التأثيرَ الكهروضوئيَّ لمعدنٍ ما، مُستعملاً ضوءًا بطولٍ موجيٍّ معيَّن، فهل تستطيعُ أن تستنتجَ أن التأثيرَ سيُلاحظُ أيضًا على معدنٍ آخرَ تحتَ ظروفٍ مشابهةٍ؟
9. ما التأثيرُ الذي تتوقَّعُه - إن وُجدَ - لدرجةِ حرارةِ سطحٍ معدنيٍّ في سهولةِ انفلاتِ إلكترونٍ من المعدنِ تحتَ التأثيرِ الكهروضوئيِّ؟
10. انحرفَ فوتونٌ بتصادمِه مع إلكترونٍ متحرِّكٍ. هل يمكنُ لتردُّدِ الفوتون، بالمطلق، أن يصبحَ أقلَّ نتيجةَ التصادمِ؟ وضِّحْ إجابتَك.

مسائلُ تطبيقية

11. لكمٍّ من إشعاعٍ كهرومغناطيسيٍّ طاقةُ 2.0 keV. ما تردُّدُه؟
12. احسبْ بوحداتِ eV طاقةَ فوتونٍ طولُهُ الموجيُّ كالتالي:
    أ. الميكروويف، 5.00 cm
    ب. الضوءُ المرئيُّ، 5.00×10^{-7} m
    ج. الأشعَّةُ السينيَّةُ (X)، 5.00×10^{-8} m
13. يشعُّ ضوءٌ تردُّدُه 1.5×10^{15} Hz، على قطعةِ قصدير، فتنبعثُ من المعدنِ إلكتروناتٌ ضوئيَّةٌ بطاقةٍ حركيةٍ قصوى 1.2 eV. ما التردُّدُ العتبةُ للمعدنِ؟
14. التردُّدُ العتبةُ للفضَّةِ يساوي 1.14×10^{15} Hz. ما دالَّةُ الشغلِ للفضَّةِ؟

نماذجُ الذرَّةِ

أسئلةُ مراجعة

15. ماذا كشفَتْ تجربةُ الرقاقةِ المعدنيَّةِ عندَ رذرفورد؟
16. إذا ثبتَتْ صحَّةُ نموذجِ رذرفورد تصبحُ الذرّاتُ بوضعٍ غيرِ مستقرٍّ تمامًا. علِّلْ ذلك.
17. كيف يمكنُ توظيفُ الطيفِ الامتصاصيِّ لغازٍ لتعرُّفِ هذا الغازِ؟
18. ما القيودُ التي يفرضُها نموذجُ بور على حركةِ إلكترونٍ داخلَ ذرَّةٍ؟
19. ما وجهُ الشبهِ بينَ نموذجِ بور لذرَّةِ الهيدروجين ونموذجِ رذرفورد؟
20. كيف يفسِّرُ نموذجُ بور الأطيافَ الذرّيَّةَ؟

أسئلةٌ حولَ المفاهيم

21. وضّحْ لماذا تكونُ الأطوالُ الموجيَّةُ في طيفِ الامتصاصِ لعنصرٍ ما موجودةً أيضًا في طيفِ انبعاثِه.

22. يُلاحظُ عادةً وجودُ خطوطِ انبعاثٍ أكثرَ من خطوطِ امتصاصٍ في الأطيافِ الذرّيَّةِ لمعظمِ العناصرِ. علِّلْ ذلك.

مسائلُ تطبيقية

23. طاقةُ إلكتروناتٍ في حالةِ الاستقرارِ للهيدروجين (E_1) تساوي -13.6 eV. موظِّفًا هذه القيمة ومخطَّطَ مستوى الطاقةِ في المثال 8 (ج)، احسبْ تردُّداتِ الفوتوناتِ المنبعثةِ عندمَا تسقطُ إلكتروناتٌ إلى مستوى الاستقرارِ من المستوياتِ التاليةِ:

أ. E_2

ب. E_3

ج. E_4

د. E_5

24. ارسمْ مخطَّطًا لطيفِ الانبعاثِ يظهرُ المواقعَ النسبيَّةَ لخطوطِ الانبعاثِ التي أنتجَتْها الفوتوناتُ في المسألةِ 23. في أيِّ جزءٍ من الطيفِ الكهرومغناطيسيِّ تقعُ هذه الخطوطُ؟

مراجعةٌ عامة

25. مصدرُ ضوءٍ طولُ موجته λ يشعُّ على معدنٍ، فيطلقُ إلكتروناتٍ ضوئيَّةً بطاقةٍ حركيةٍ قصوى 1.00 eV. مصدرُ ضوءٍ ثانٍ طول موجته $\frac{1}{2}\lambda$ يُطلقُ إلكتروناتٍ ضوئيَّةً بطاقةٍ حركيةٍ قصوى 4.00 eV. ما دالَّةُ الشغلِ للمعدنِ؟

26. تقعُ كتلةُ 0.50 kg من ارتفاعِ 3.0 m. إذا أمكنَ تحويلُ طاقةِ هذه الكتلةِ بأكملِها إلى ضوءٍ مرئيٍّ طولُهُ الموجيُّ 5.0×10^{-7} m، فكم يكونُ عددُ الفوتوناتِ المُنتَجةِ؟

27. يُنتجُ ضوءٌ أحمرُ $(\lambda = 670.0\ \text{nm})$ إلكتروناتٍ ضوئيَّةً من معدنٍ معيَّنٍ. بينما ينتجُ ضوءٌ أخضرُ $(\lambda = 520.0\ \text{nm})$ إلكتروناتٍ ضوئيَّةً من المادَّةِ نفسِها بطاقةٍ حركيةٍ قصوى تُعادلُ 1.50 مرَّة الطاقةَ الحركيةِ القصوى السابقةِ. ما دالَّةُ الشغلِ لهذه المادَّةِ؟

المشاريعُ والتقاريرُ

1. حصل كلّ من بور وآينشتاين وبلانك وهايزنبرغ على جائزة نوبل، لإسهاماتهم في تطوّر الفيزياء في القرن العشرين. كما أن حياة كلّ من هؤلاء العلماء قد تأثّرت إلى حدٍّ بعيد بمجريات الحرب العالمية الثانية. ابحث في حياة كلّ من هؤلاء وفي تأثير الحرب عليه. كيف كانت آراؤهم حول العلوم والحرب والسياسة خلال فترة الحرب وبعدها؟ اكتب تقريرًا يلخص ما حصلت عليه، ويبيّن آراء فريقك البحثي حول دور العلماء في السياسة ومسؤوليتهم.

2. قم ببحث تظهر فيه الخطّ الزمني لتطوُّر نظريّات الذرّة. اذكر الظواهر التي أدَّت إلى تطوير النظرية في كلّ مرَّة، واسم العالِم الذي قام بتطويرها، ثمّ تابع هذا التطوُّر بناءً على نظرية ميكانيكا الكمّ.

تقويم الفصل 8

اختيارٌ من متعدِّد

1. ما مرادفُ «كمٌّ من الضوء»؟
   أ. إشعاعُ الجسمِ الأسودِ.
   ب. مستوى الطاقةِ.
   ج. تردُّد.
   د. فوتون.

2. استند إلى الفيزياءِ التقليديَّةِ، وافترضْ أن ضوءًا يُشعُّ على سطحٍ حسّاسٍ للضوءِ. ما الذي يحدِّدُ الزمن الذي تستغرقُه الإلكتروناتُ قبلَ انطلاقِها من السطحِ؟
   أ. التردُّد.
   ب. الشدَّة.
   ج. طاقةُ الفوتونِ.
   د. الطولُ الموجيُّ.

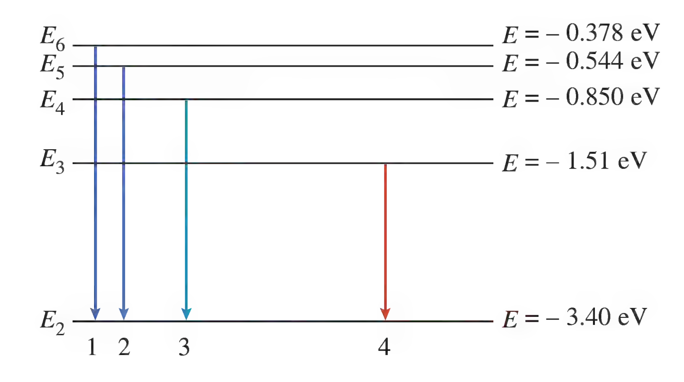
3. تبعًا لنظريةِ الفوتونِ لآينشتاين، ما الذي تحدِّدُهُ شدَّةُ الضوءِ الساقطِ على معدنٍ؟
   أ. عددُ الفوتوناتِ الساقطةِ على المعدنِ خلالَ فترةٍ معيَّنةٍ من الزمنِ.
   ب. طاقةُ الفوتوناتِ الساقطةِ على المعدنِ.
   ج. ما إذا كانَ هناك إلكتروناتٌ ضوئيَّةٌ قد انبعثَتْ.
   د. KE_m للإلكتروناتِ الضوئيَّةِ المنبعثةِ.

4. تشتّتَ فوتونٌ من أشعَّةِ X عندَ اصطدامِ الأشعَّةِ بإلكترونٍ ساكنٍ. كيف تُقارنُ تردُّدَ الفوتونِ المشتَّتِ مع تردُّدِه قبلَ تشتُّتِهِ؟
   أ. التردُّدُ الجديدُ أعلى.
   ب. التردُّدُ الجديدُ أقلُّ.
   ج. التردُّدُ هو نفسُه.
   د. الفوتونُ المشتَّتُ لا تردُّدَ له.

5. أيٌّ مما يلي يلخِّصُ نموذجَ تومسون للذرَّةِ؟
   أ. الذرّاتُ صلبةٌ ومتجانسةٌ وغيرُ قابلةٍ للكسرِ.
   ب. الإلكتروناتُ مغمورةٌ في كرةٍ ذاتِ شحنةٍ موجبةٍ.
   ج. الإلكتروناتُ تدورُ حولَ النواةِ بنمطٍ شبيهٍ بدورانِ الكواكبِ حولَ الشمسِ.
   د. الإلكتروناتُ موجودةٌ فقطْ في مستوياتِ طاقةٍ منفصلةٍ.

6. ماذا يحدثُ عندَما ينتقلُ إلكترونٌ من مستوى طاقةٍ مُعيَّنٍ إلى مستوى أدنى في الذرَّةِ؟
   أ. تُمتصُّ الطاقةُ من مصدرٍ خارجَ الذرَّةِ.
   ب. تزدادُ الطاقةُ الموجودةُ في المجالِ الكهرومغناطيسيِّ داخلَ الذرَّةِ.
   ج. تُطلقُ الطاقةُ عبرَ نطاقٍ مستمرٍّ من القيمِ.
   د. ينبعثُ فوتونٌ بطاقةٍ تساوي فرقَ الطاقةِ بين المستويَيْنِ.

استعمل مخطَّطَ مستوى الطاقةِ للهيدروجين أدناه للإجابةِ عن السؤالَيْنِ 7 و 8.



7. ما تردُّدُ الفوتونِ المنبعثِ، عندَما يقفزُ إلكترونٌ من E_5 إلى E_2؟
   أ. 2.86 eV
   ب. 6.15×10^{14} Hz
   ج. 6.90×10^{14} Hz
   د. 4.31×10^{33} Hz

8. ما تردُّدُ الفوتونِ الذي يُمتصُّ عندَما يقفزُ إلكترونٌ من E_2 إلى E_3؟
   أ. 1.89 eV
   ب. 4.56×10^{14} Hz
   ج. 6.89×10^{14} Hz
   د. 2.85×10^{33} Hz

9. ما نوعُ الطيفِ الذي ينشأُ بتطبيقِ فرقِ جُهدٍ مرتفعٍ على غازٍ ذرّيٍّ صافٍ؟
أ. طيفٌ انبعاثي.
ب. طيفٌ امتصاصي.
ج. طيفٌ مستمر.
د. طيفٌ مرئي.

10. ما نوعُ الطيفِ المُستعملِ لتعرُّفِ عناصرَ في أجواءِ النجوم؟
أ. طيفٌ انبعاثي.
ب. طيفٌ امتصاصي.
ج. طيفٌ مستمر.
د. طيفٌ مرئي.

أسئلةٌ ذاتُ إجابةٍ قصيرةٍ

11. ما طاقةُ فوتونٍ من الضوءِ تردُّده $f = 2.80 \times 10^{14}$ Hz؟ اكتُبْ جوابَك بوحدتَي J و eV.

12. يشعُّ ضوءٌ طول موجته 3.0×10^{-7} m على معادنِ الليثيومِ والحديدِ والزئبقِ، والتي تبلغُ دالاّتُها للشغلِ 2.3 eV، 3.9 eV، 4.5 eV على التوالي. أيُّ المعادنِ لديها التأثيرُ الكهروضوئيُّ؟ احسُبِ الطاقةَ الحركيةَ القصوى للإلكتروناتِ الضوئيَّةِ لكلٍّ من المعادنِ ذاتِ التأثيرِ الكهروضوئيِّ.

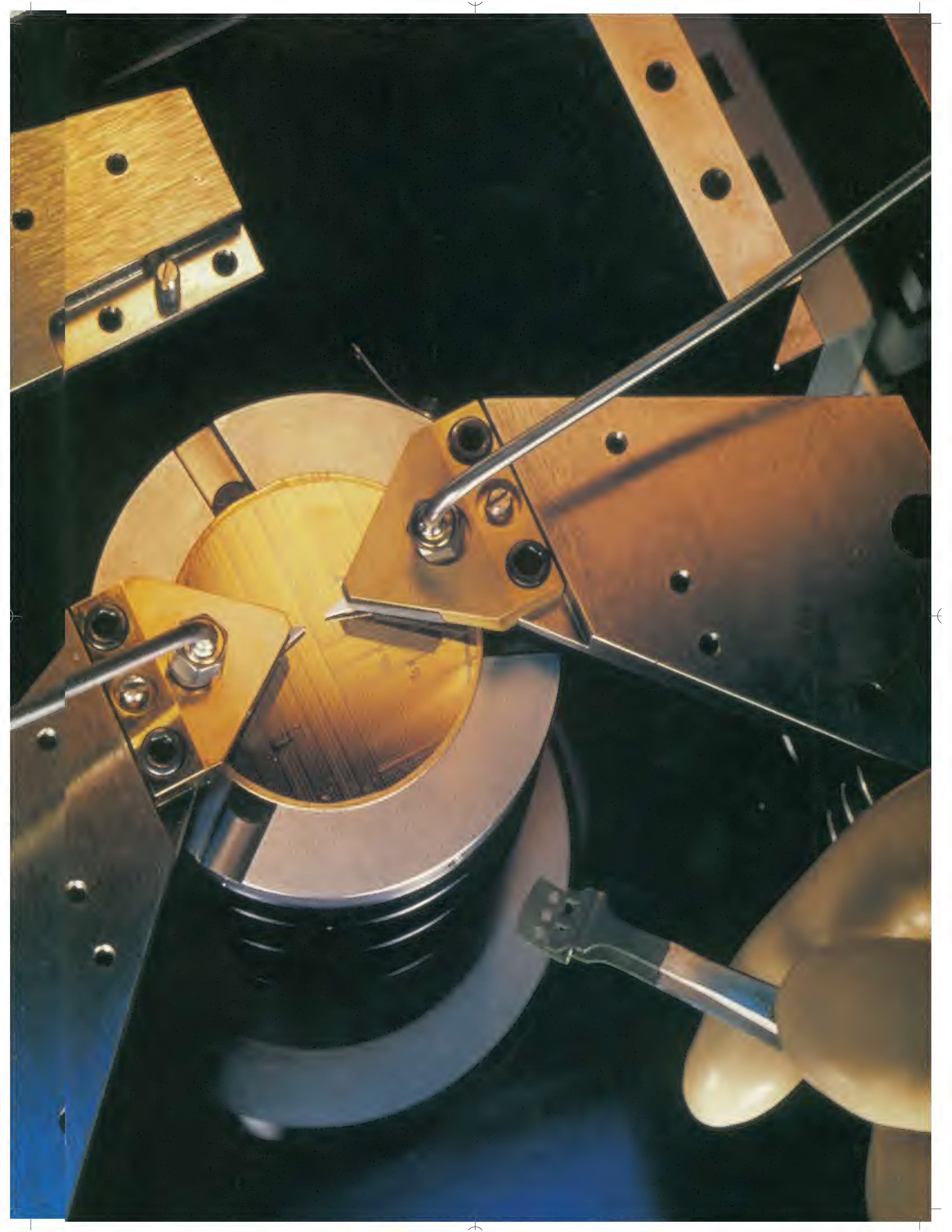
أسئلةٌ ذاتُ إجابةٍ مطوَّلةٍ

13. صفْ نموذجَ بور للذرَّةِ. اذكُرِ افتراضاتِ بور التي شكّلَتْ منعطفًا عن افتراضاتِ الفيزياءِ التقليديَّةِ. وضّحْ كيفَ يفسِّرُ نموذجُ بور الأطيافَ الذرّيَّةَ.

14. تنطلقُ إلكتروناتٌ من سطحٍ بسرعاتٍ تصلُ إلى 4.6×10^{5} m/s، لدى استعمالِ ضوءٍ طولُ موجتِه 625 nm.
أ. ما دالَّةُ الشغلِ لهذا السطحِ؟
ب. ما تردُّدُ العتبةِ لهذا السطحِ؟ بيِّنْ طريقةَ عملِك.

فكرةٌ مفيدةٌ للاختبار:

اقرأ كلَّ جوابٍ بتمهُّلٍ لدى إجابتِك عن اختيارٍ من متعدِّدٍ. لا تنخدعْ بالأجوبةِ الخاطئةِ، والتي قد تبدو صحيحةً من النظرةِ الأولى.



الفصـــــل 9



الإلكترونيات الحديثة
Modern Electronics



يظهرُ الشكل رقاقة من السيليكون المتعدِّد البلّورات والمستخرج من الرمل. وعلى الرغم من أن السيليكون يكون عادة شبه موصّل، فإن إضافة عدد من ذرّات شائبة يمكن أن تغيِّر موصليته بمقدار ملحوظ. إن إضافة الشوائب بدقة وحذر مترافقين مع حفرٍ دقيق يُمكن أن تكوِّن على سطح الرقاقة دوائر كهربائية متكاملة ذات خصائص كهربائيّة خاصة. وإذا لم تظهر أيّ عيوب خلال عملية الاختبار، المبيّنة هنا، تُقطَّعُ الرقاقة إلى شرائح بوساطة مقصّ من الماس، ثم تجمَّعُ لتُستعمل في أجهزة إلكترونية.

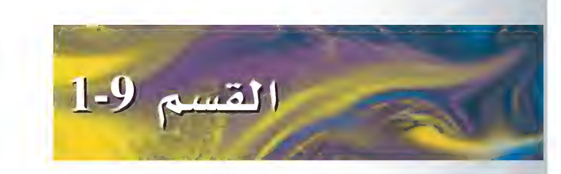
ما يُتوقَّعُ تحقيقُهُ

تتعرَّف في هذا الفصل حالات المواد موصّلة للكهرباء أو شبه موصّلة أو عازلة. كما تتعرّف كيف يمكن استعمال المكوِّنات المصنوعة من أشباه الموصّلات للتحكّم بالتيار الكهربائي.

ما أهميَّتُهُ

لا تكاد تخلو أيّ أداة من الأدوات الكهربائيَّة التي نستعملها في عصرنا الحاضر من ترانزيستورات وشرائح كهربائيَّة بدءًا بالألعاب الكهربائيَّة وانتهاءً بالحاسوب والأقمار الاصطناعيَّة.

محتوى الفصل 9



التوصيل في الأجسام الصلبة
Conduction in the Solid State

9-1 أهداف القسم

- يميّز بين الموصّلات والعوازل وأشباه الموصّلات.
- يحدّد إلكترونات التكافؤ.
- يصف دور حُزَمُ الطاقة في الموصليّة الكهربائيّة.

تصنيفُ الأجسامِ الصلبة

تعلَّمت، أن من الممكن تصنيف الموادّ بحسب قابليتها لتوصيل الكهرباء. *الموصّل* الجيد يحتوي على عدد كبير من حاملات الشحنات الكهربائيّة الحرَّة التي يمكنها التحرُّك بسهولة عبر المادّة، بينما يحتوي العازل على عدد صغير من حاملات الشحنات الكهربائيّة الحرّة التي تكون ساكنة نسبيًّا. أما *أشباه الموصّلات* فلها خصائص إلكترونيّة ما بين خصائص الموصّلات وخصائص العوازل. توجد فروقات كبيرة في الموصّلية الكهربائيّة ما بين الموصّلات والعوازل وأشباه الموصّلات، ويمكن أن تعود هذه الفروق إلى حزَم الطاقة، التي سنتناول مفهومها في هذا القسم.

من إنجازات *فيزياء الحالة الصلبة* تطوير نظرية تستعمل المبادئ الأساسيّة للفيزياء لتوضيح بعض خصائص تلك الفئات الثلاث من المواد.

الحاجة إلى نموذج أكثر تعقيدًا للذرّات وللأجسام الصلبة

النماذج التي جرت مناقشتها أعلاه هي لأجسام صلبة، وكأنها مجموعة من أنوية ذرّات ذات شحنة موجبة تحيط بها الإلكترونات التابعة لها. هذا النموذج البسيط ليس بالدقَّة الكافية، فهو لا يوضّح مثلاً لماذا تكون الإلكترونات أحيانًا حرّة وأحيانًا أخرى مربوطة بالأنوية. كما أن هذا النموذج لا يوضّح لماذا تختلف قابلية توصيل الكهرباء بين الموصّلات والعوازل كمجموعتين، أو ضمن مجموعة الموصّلات أو العوازل نفسها. إذًا توجد حاجة لوضع نماذج أفضل خاصة بالذرَّة وبالأجسام الصلبة. وهو ما سنحاول تطويره في هذا القسم.

النواة منطقة ذات كثافة عالية تقعُ في مركز الذرَّة. وتتكوَّن من بروتونات ذات شحنة موجبة ومن نيوترونات لا شحنة لها. تكون النواة محاطة بإلكترونات لها شحنة سالبة موزَّعة على سلسلة من الطبقات. وكما هو مبيّن في **الشكلِ 9-1**، تكون الذرّة متعادلة أي ليس لها إجمالاً شحنة كهربائيّة.



الشكل 9-1
هذه هي الأشكال والحجوم التقريبيّة للمناطق حول النواة، والتي تحتوي على إلكترونات بحسب مستويات الطاقة.

تحدّد إلكترونات التكافؤ الخصائص الكيميائيّة للذرّة

يمكن أن يتراوح عدد الإلكترونات في الذرَّة ما بين 1 وأكثر من 100 إلكترون، اعتمادًا على نوع الذرّة. يمكن تبسيط التوزيع المعقَّد للإلكترونات حول الأنوية ذات الشحنة الموجبة، ولذلك نستعمل نموذجًا يجعل الإلكترونات في مجموعات أو طبقات، تكون كل مجموعة منها داخل حيّز له شكل خاصّ كالكرة، كما في **الشكل 9-1**.

حين تزداد المسافة بين الإلكترون ونواة الذرّة ذات الشحنة الموجبة تنخفض القوَّة الكهربائية بينهما ويصبح الإلكترون أضعف ارتباطًا بالذرّة. توضّح هذه النتيجة جزئيًّا لماذا تكون إلكترونات التكافؤ (إلكترونات الطبقة الخارجيّة للذرات) أضعف ارتباطًا بالذرّة من إلكترونات الطبقات الداخليّة.

إلكترون التكافؤ

إلكترون موجود في الطبقة الخارجيّة الأبعد من نواة الذرة.

ولأن الإلكترونات في الطبقات الخارجيّة الأبعد، وتسمى **إلكترونات التكافؤ** Valence electrons هي الأضعف ارتباطًا بالذرّة، فإنها الإلكترونات التي تسبّب التفاعلات الكيميائيّة الأكثر شدَّة مع ذرّات أخرى. بالنتيجة فإن سلوك إلكترونات التكافؤ في الذرَّة يحدِّد الخصائص الكيميائيّة للذرَّة. يمكن اعتبار إلكترونات الطبقات الداخليّة للذرّة والنواة شحنة نقطيّة منفردة محاطة بإلكترونات تكافؤ.

الإلكترونات تشغل مستويات طاقة

عرفنا عند دراسة ذرّة بور أن إلكترونات الذرّة لها مقادير معيَّنة من الطاقة. لهذا يقال أحيانًا أن الإلكترونات تشغل *مستويات طاقة* خاصة. تشكِّل الإلكترونات الموجودة في طبقة ما أحيانًا مجموعة من مستويات الطاقة متقاربة جدًّا. توجد الإلكترونات عادة في مستويات الطاقة الأدنى المتوافرة. يسمى الترتيب الخاص للإلكترونات حين تكون في مستويات الطاقة الأدنى المتوافرة **الحالة الأرضية** Ground state للذرَّة.

الحالة الأرضيّة

حالة الطاقة الأدنى لمنظومة مكمّاة.

الحالة المستثارة

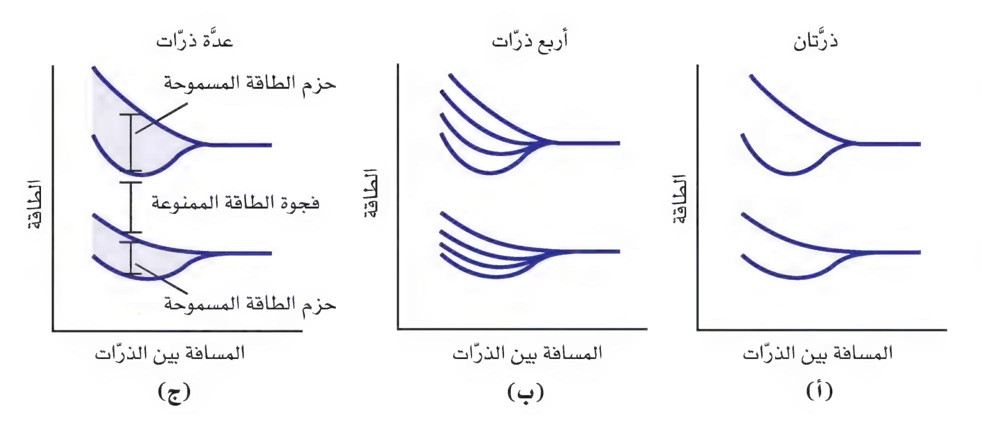
حالة ذرّة ليست في الحالة الأرضيّة.

تستطيع الذرَّة أحيانًا أن تمتصَّ طاقة من المحيط. وإذا كانت الطاقة المتوافرة كافية فإن أحد إلكترونات الذرّة يمكنه الانتقال إلى مستوى طاقة أعلى. وحين يحدث ذلك يُقال إن الذرّة أصبحت في **حالة مستثارة** Excited state. يمكن للإلكترون أيضًا أن يمتص الكثير من الطاقة فينعدم ارتباطه بالذرَّة. عندئذ يسمى الإلكترون *إلكترونًا حرًّا*.

نظريَّةُ الحُزَم

النموذج الذي يمكن استعماله كي نفهم سبب توزُّع الأجسام الصلبة في ثلاث فئات، هي الموصِّل والعازل وشبه الموصّل، يسمّى *نظرية الحزم*. يمكن لنظرية الحزم أن تفسِّر آليات التوصيل في الكثير من الأجسام الصلبة، وكذلك التغيُّرات الكبيرة في الموصلية الكهربائيّة لهذه المواد.

حين تكون ذرّات متماثلة متباعدة، يكون لها أنماط مستويات طاقة متماثلة ودالّات موجيّة متماثلة. حين تُقرَّب الذرّات من بعضها تتداخل دالّاتها الموجيّة. وبما أن من غير الممكن لإلكترونَيْن من المنظومة نفسها أن يشغلا الحالة نفسها، فإن مستوى الطاقة في ذرّة معيَّنة يتغيَّر تحت تأثير المجال الكهربائي للذرَّة الأخرى. في حالة الذرَّتَيْن ينقسم كل مستوى طاقة إلى مستويي طاقة مختلفين ومتقاربَيْن.



الشكل 9-2

تنقسم مستويات الطاقة عندما تصبح ذرَّتان متقاربتَيْن (أ). يؤدّي تقريب عدَّة ذرّات إضافية إلى حدوث المزيد من الانقسام (ب). حين تتفاعل عدّة ذرّات تكون مستويات الطاقة متقاربة جداً بحيث يمكن تمثيلها بحزم طاقة (ج).

يُبيِّن **الشكل 9-2** انقسام مستويَي طاقة عندما تصبح الذرَّتان متقاربتَيْن. لاحظ أن فرقَ الطاقةِ بين مستويَي الطاقة الجديدَيْن يعتمد على المسافة الفاصلة بين الذرَّتَيْن.

حين تُقرَّب ذرّات عدَّة بعضها من بعض ينقسم كل مستوى طاقة إلى عدَّة مستويات. يعتمد عدد الانقسامات على عدد الذرات المتفاعلة. فحين تكون عدّة ذرّات متقاربة ينقسم مستوى الطاقة مرّات عدَّة وتصبح مستويات الطاقة الجديدة متقاربة جدًّا، وفرق الطاقة بين مستويتين متجاورتين قليلة جدًّا بحيث يمكن اعتبارها كحزم طاقة متواصلة.

التقارب الشديد للذرّات يجعل بعض مستويات الطاقة حزم طاقة

حين تترابط الذرّات في جسمٍ صلب تتوسَّع مستويات الطاقة للذرَّة الواحدة وتصبح حزم *طاقة* مثل تلك المبيَّنة في **الشكل 9-3**.

إن أهم حزمة طاقة هي أعلى حزمة تحتوي على مستويات طاقة تشغلها إلكترونات، وتُعرف باسم حزمة *التكافؤ*. في الأجسام الصلبة العازلة وشبه الموصِّلة لا توصل إلكترونات التكافؤ الكهرباء. لكن في الأجسام الصلبة الموصِّلة تكون إلكترونات التكافؤ قابلة لتوصيل الكهرباء.

يمكن أن يوجد المزيد من الحزم التي لها طاقة أدنى من طاقة حزمة التكافؤ، وتكون هذه الحزم ممتلئة تمامًا بالإلكترونات. لذلك تكون مساهمتها ضعيفة في تحديد الخصائص الكهربائيّة للأجسام الصلبة.

بالإضافة إلى حزمة التكافؤ، هناك حزم أخرى ذات طاقة أعلى لا تحتوي على إلكترونات. إن الحزمة الأعلى مباشرة من حزمة التكافؤ في أشباه الموصّلات والعوازل تُسمّى حزمة التوصيل. حين تُستثار ذرَّة يمكن أحيانًا لإلكترونات التكافؤ الانتقال إلى حزمة التوصيل هذه. وهكذا يمكن لتلك الإلكترونات الإسهام في توصيل الكهرباء كما سنرى لاحقًا.



الشكل 9-3

تصبح مستويات الطاقة في الذرّات حزم طاقة في الأجسام الصلبة. حزمة التكافؤ هي أعلى حزمة تشغلُها إلكترونات.

فجوة طاقة توجد أحيانًا بين الحزم

إن مدى الطاقة الموجود بين حزمة التكافؤ وحزمة التوصيل يسمى **فجوة الطاقة** Energy gap أو *فجوة الحزم* Band gap كما هو مبيّن في **الشكل 9-3**. لا يمكنُ لإلكترون في جسم شبه موصِّل أو عازل أن يكونَ ذا طاقة موجودة في فجوة الطاقة. ولأن مستوياتِ الطاقةِ في فجوةِ الطاقةِ ليس مسموحًا أن يشغلَها إلكترون في جسم صلب

فجوة الطاقة

هي مدى الطاقة الفاصل بين أعلى حزمة طاقة مشغولة بالإلكترونات، وأسفل حزمة طاقة خالية من الإلكترونات.

عازل أو شبه موصِّل، فإنها تعرفُ أحيانًا باسم «فجوة الطاقة الممنوعة».

يختلفُ قياسُ فجوة الحزم باختلافِ الموادِّ وينتجُ عن هذا الاختلافِ خصائصُ مختلفة. في الجسم الصلب العازل تكون الفجوة واسعة إلى حدٍّ لا يمكن لأيّ إلكترون أن يكتسبَ طاقةً كافيةً للانتقالِ من حزمةِ التكافؤِ إلى حزمةِ التوصيل. في شبه الموصِّل تكون الفجوة أصغر نوعًا ما، فيصبح من الممكن أن ينتقل إلكترون إلى حزمة التوصيل. في الموصِّل تكون حزمة التكافؤ مشغولةً جزئيًّا، فلا توجد بالتالي فجوة بين المستويات المشغولة والمستويات الخالية المتوافرة.

الحزمة مشغولةٌ كلّيًا أو جزئيًا

تشغلُ الإلكتروناتُ عادة في جسمٍ صلب مستويات الطاقة السفلى المتوافرة في الذرّة. حين تملأ إلكترونات مستويات الطاقة في الذرّة، فإنها تشغل مستويات الطاقة السفلى أولاً. عادة لا توجد إلكترونات في مستويات الطاقة العليا في الذرّة إلاّ إذا كانت جميع مستويات الطاقة السفلى مملوءة بالكامل.

إذا كانت الإلكترونات في جسم صلب، أكثر من مستويات الطاقة في حزمة الطاقة السفلى، فإن تلك الحزمة تكون ممتلئة. وبما أن من غير الممكن لمزيد من الإلكترونات أن تتحرَّك في حزمة ممتلئة، فإن الإلكترونات الإضافية ينبغي أن تشغل مستويات الطاقة في حزمة الطاقة الأعلى مباشرة، من الحزمة السابقة.

الحزمة في بعض الموادّ تتضمّن مستويات طاقة أكثر من عدد الإلكترونات المتوافرة لشغلها. في هذه الحالة تكون الحزمة مشغولةً جزئيًّا. أن يكون مستوى الطاقة الأعلى مشغولاً أو مملوءًا كليًّا أو جزئيًّا مهمّ جدًّا في تحديد الخصائص الكهربائيّة للمادّة المعنيَّة. وهذا يعني أن الخصائص الكهربائيَّة للموادّ التي تكون فيها حزم الطاقة مملوءة جزئيًّا تكون مختلفة عن الخصائص الكهربائيّة للمواد التي تكون فيها حزم الطاقة مملوءة كليًّا.

انتقالُ الإلكترونات بين مستويات الطاقة لجسم صلب

تعرف أن الإلكترون في الذرّة حين يمتصُّ طاقة، يمكن أن يُثار إلى مستوى طاقة أعلى. لكن الإلكترون يمكنه أن يمتصَّ فقط مقادير طاقة تساوي الفروق بين مستويات الطاقة للذرَّة.

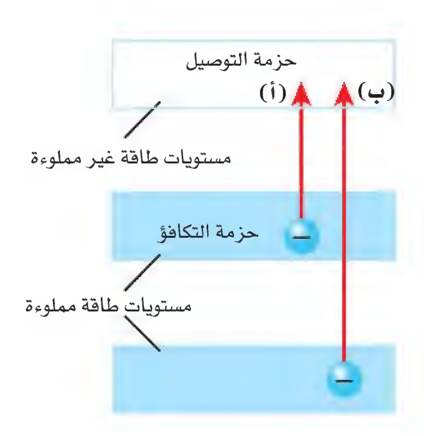
يمكن أن تحدث العملية نفسها في جسم صلب، إذ يمكن للإلكترونات التي تمتصُّ طاقة أن تُثار إلى مستويات طاقة أعلى. ينبغي أن يعطى الإلكترون طاقة كافية ليشغل مستوى طاقة أعلى ومتوافر.

يبيِّن **الشكل 9-4** نمط الحزم الثلاث الأعلى لجسم صلب مع فجوة طاقة بين كلّ شريطين متتاليين. على الرغم من أن تلك الحزم ذات لون واحد وغير منقطع فإنها في الواقع مكوّنة من مستويات طاقة كثيرة ومتقاربة. إن جميع مستويات الطاقة في الحزمتَيْن الدنيوَيْن مملوءة بالكامل بالإلكترونات.

ما الانتقالات الممكنة لإلكترون في هذا الجسم الصلب؟ بما أن مستويات الطاقة غير المملوءة موجودة في حزمة التوصيل، تكون الانتقالات الممثّلة بـ (أ) و (ب) وحدها ممكنة. لكن الانتقال (أ) يحدث بسهولة أكثر من الانتقال (ب) لأن الانتقال (أ) يتطلب طاقة أقل. لهذا السبب ليس لحزم الطاقة التي تقع أسفل حزمة التكافؤ تأثير ملحوظ

هل تعلم؟

على الرغم من أن حزم الطاقة موجودة في كل الأجسام الصلبة، فإن تعبير «حزم الطاقة» يستعمل عادة في حالة الأجسام الصلبة البلورية. وهي مواد مكوّنة من ذرّات مرتبة في أنماط متكرِّرة ومنتظمة.



الشكل 9-4
وحدها انتقالات الإلكترونات التي تحدث بين مستويات الطاقة غير المملوءة، كالانتقالين (أ) و (ب) تكون ممكنة في جسم صلب. لكن الانتقال (ب) يتطلّب مقداراً كبيراً من الطاقة فلا يحدث بسهولة.

في الخصائص الكهربائيّة للموادّ. يلزم مقدار كبير من الطاقة كي يثار إلكترون موجود في تلك الحزم ذات الطاقة المنخفضة، وينتقل إلى مستوى طاقة أعلى غير مملوء. ومن دون طاقة كافية سيبقى الإلكترون في مستوى الطاقة الأدنى، ولن يؤثّر بالتالي في الخصائص الكهربائيّة، كما تفعل إلكترونات التكافؤ.

التوصيل وانتقال الإلكترونات

تعرّفنا سابقًا إلى نظرية الحزم للأجسام الصلبة وطرائق انتقال الإلكترون من مستوى طاقة إلى آخر ضمن الحزمة الواحدة، أو من حزمة إلى أخرى. هذه الانتقالات لا تمثّل حركة انتقال مادة الإلكترونات لكنها تمثّل تغيّرات في طاقة الإلكترونات.

تعتمد حركة مادة الإلكترونات في جسم صلب، أي توصيل الكهرباء، على ترتيب الإلكترونات في حزم الجسم الصلب. ذلك أن الإلكترون المتحرّك يتحرّك باتجاه مستوى طاقة غير مملوء.

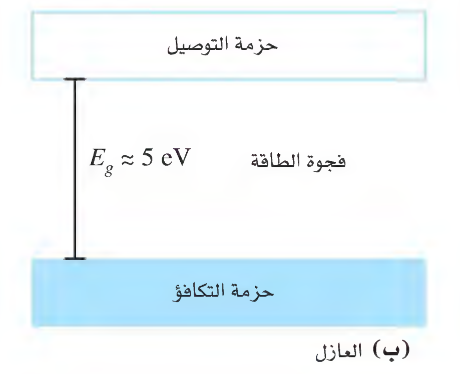
تحتاج الإلكترونات المترابطة إلى طاقة للتخلُّص من القوة الكهربائيّة التي تربطها بالذرّة. يمكن استثارة إلكترونات إلى مستويات طاقة أعلى بإحدى الطريقتين المهمّتين التاليتين: تطبيق مجال كهربائي أو الاستثارة الحرارية.

حين يُطبّق مجال كهربائي على جسم صلب يبذل هذا المجال شغلاً على كل واحدٍ من إلكترونات الذرّة، فيمنحه ذلك طاقة كافية للانتقال إلى مستويات طاقة أعلى في الذرّة.

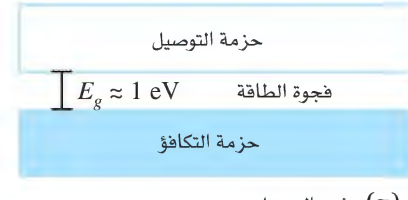
يمكن لامتصاص طاقة حرارية أن يستثير إلكترونات جسم صلب. تقوم الذرّات في جسم صلب باهتزازات عشوائيّة، أي تكون لديها طاقة حرارية. يمكن لتلك الاهتزازات أن تنقل أحيانًا طاقة كافية إلى إلكترون فتستثيره إلى مستوى طاقة أعلى. عندما يكون الجسم الصلب عند درجة حرارة الغرفة تستثار بعض الإلكترونات الموجودة إلى مستويات الطاقة غير المملوءة والقريبة منها.

حزمة التكافؤ

(أ) الموصّل



(ب) العازل



(ج) شبه الموصل

الشكل 9-5

الموصّل (أ) له حزمة تكافؤ مملوءة جزئيًّا. العوازل (ب) وأشباه الموصّلات (ج) لها حزم توصيل فارغة وحزم تكافؤ مملوءة، لكن فجوة الطاقة في شبه الموصّل أصغر مما هي في الجسم العازل.

الموصّل له حزمة تكافؤ مملوءة جزئيًّا

إذا تداخلَت حزمة التكافؤ مع حزمة التوصيل، يكون الجسم الصلب موصّلاً. مثلاً يبيّن **الشكل 9-5** (أ) حزمة تكافؤ هي في الوقت نفسه حزمة توصيل. تكون الحزم في هذه الحالة مملوءة جزئيًّا. توجد أعلى مستويات الطاقة المملوءة عند وسط الحزم. حين تضاف طاقة يمكن لإلكترونات أن تستثار من مستويات الطاقة المملوءة إلى مستويات طاقة خالية وأعلى.

في الجسم الصلب الموصِّل عدَّة إلكترونات تحتاج إلى مقدار قليل من الطاقة كي تنتقل إلى مستويات طاقة قريبة وغير مملوءة. ويمكن نقل مقدار الطاقة هذا سواء بتطبيق مجال كهربائي أو عبر الاستثارة الحرارية. عند ذلك تصبح تلك الإلكترونات قابلة لأن تتحرَّك بحرِّية في الجسم الموصِّل عند تطبيق مجال كهربائي ضعيف. من الخصائص الرئيسة للموصِّل أن حزمة التوصيل لديها تكون مملوءة جزئيًّا، وليس لمقدار فجوة الطاقة تأثير يُذكر.

العازل له حزمة تكافؤ مملوءة بالكامل وفجوة طاقة واسعة

تكون حزمة التوصيل للجسم العازل فارغة وتكون حزمة التكافؤ لديها مملوءة، كما هو

مبيّن في **الشكل 9-5** (ب). كما أن لديها فجوة طاقة واسعة (حوالي 5-10 eV) تفصل بين حزمة التوصيل وحزمة التكافؤ. في الواقع تكون فجوة الطاقة واسعة إلى حدٍّ يصعب معه اكتساب إلكترون طاقة كافية كي يستثار إلى حزمة التوصيل.

مثلاً عند درجة حرارة الغرفة تمنح الاستثارات الحراريّة الإلكترونات حوالي 0.025 eV ، وهي أصغر كثيرًا من فجوة الطاقة. وفي حالة كهذه تستثار إلكترونات معدودة حراريًّا إلى حزمة التوصيل. هكذا، وعلى الرغم من أن للعازل مستويات طاقة كثيرة خالية من حزمة التوصيل الخاصّة به، فإن عددًا قليلاً من الإلكترونات يشغل مستويات الطاقة تلك، فتصبح الموصّليّة الإجماليّة صغيرة جدًّا، وتكون بالتالي المقاومة الكهربائيّة كبيرة في حالة الأجسام العازلة.

شبه الموصّل له حزمة تكافؤ مملوءة وفجوة طاقة صغيرة

شبه الموصّل هو حالة وسط بين الموصّل والعازل. تكون حزمة التكافؤ لشبه الموصّل مملوءة، مثله مثل العازل، كما هو مبيَّن في **الشكل 9-5** (ج). لكن فجوة الطاقة لشبه الموصّل أصغر من فجوة الطاقة للجسم العازل (حوالي 1 eV). في الواقع تكون فجوة الطاقة للكثير من أشباه الموصّلات صغيرة إلى حدٍّ كافٍ لاستثارة إلكترونات إلى حزمة التوصيل وبسهولة. لذلك تعتمد موصليّة الكثير من أشباه الموصِّلات، وبشدة، على درجة الحرارة.

مثلاً، عند درجة حرارة قريبة من 0 K، تكون معظم الإلكترونات موجودة في حزمة التكافؤ. كما أن طاقةً حراريّةً ضئيلةً تتوافرُ للاستثارة. هذا يجعل أشباه الموصِّلات موصّلات ضعيفة عند درجات الحرارة المنخفضة. عند درجات الحرارة المرتفعة يمكن استثارة عدد كبير من الإلكترونات حراريًّا من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل التي يقع فيها الكثير من مستويات الطاقة الخالية. ولأن احتمال حدوث الاستثارة الحرارية عبر الفجوة الضيقة يكون كبيرًا عند درجات الحرارة المرتفعة، فإن موصليّة أشباه الموصّلات تزداد بشدَّة مع ازدياد درجة الحرارة. إن تطبيقَ مجالٍ كهربائيٍّ على شبه الموصِّل يبذلُ شغلاً على إلكترونات، فتزدادُ طاقتها فتصبح قادرة على تكوين تيّار كهربائي وتوصيله.

مراجعةُ القسم 9-1

1. تعرف أن مقاومة الموصِّلات تزداد بارتفاع درجة الحرارة. لكن مقاومة أشباه الموصّلات تنخفض بارتفاع درجة الحرارة. كيف توضِّح هذه الخاصّية لأشباه الموصّلات؟

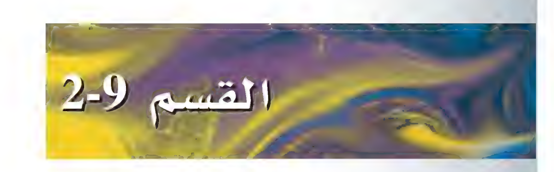
2. أي من الإلكترونات التالية هو إلكترون تكافؤ؟

أ. الإلكترون الأقرب إلى النواة في ذرّة يورانيوم.

ب. إلكترون يقع على مستوى الطاقة الأبعد لذرّة كالسيوم.

ج. إلكترون يقع على مستوى الطاقة الأبعد الثاني لذرّة بروmين.

3. أي حزمة تحتوي على مستويات الطاقة لإلكترونات قادرة على التحرُّك بحرِّية في شبه موصِّل؟ وأيّ حزمة تحتوي على مستويات طاقة لإلكترونات لا تستطيع التحرُّك في شبه موصِّل؟



تطبيقاتُ أشباه الموصِّلات
Semiconductor Applications

9-2 أهداف القسم

- يقارنُ أدوارَ الإلكترونات والثقوب ذات الشحنة الموجبة في توصيل التيّار الكهربائي.
- يصفُ عمليةَ الإشابةِ لتكوين أشباه موصلات صنف n وصنف p.
- يحلِّلُ وصلاتِ p-n ودورها في أجهزة أشباه الموصِّلات.
- يوضِّحُ دورَ البلورة الثنائية كمقوِّم.
- يوضِّح كيف يمكنُ استعمالَ الترانزيستور كمضخم.

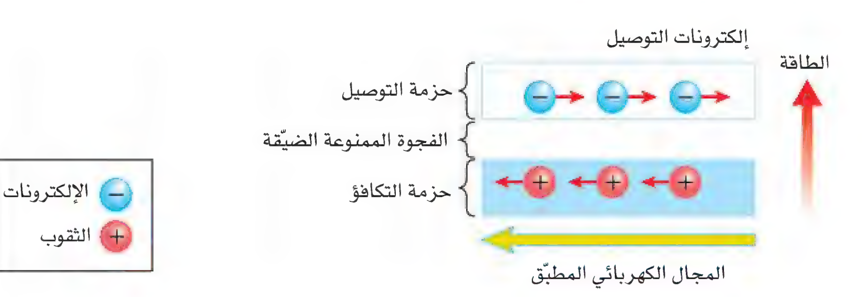
الثقب

مستوى طاقة شبه موصِّل ليس فيه إلكترون.

إشابةُ شبهِ الموصِّل

يمكنُ أن تكونَ حاملات الشحنةِ في شبهِ موصِّل سالبة أو موجبة. لمعرفة سبب ذلك علينا أن ننظر في حزمتَي التكافؤ والتوصيل لشبه موصِّل المبيَّنتَين في **الشكل 9-6**. تخيَّل أنّ عدَّة إلكترونات قد استثيرت من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل بوساطة مجال كهربائي. تكون الإلكترونات الموجودة في حزمة التوصيل حرَّة في أن تتحرَّك عبر المادّة. وتكون الإلكترونات الموجودة في حزمة التكافؤ غير قادرة على التحرُّك لأن كل مستويات الطاقة القريبة تكون مملوءة بإلكترونات. لكن حين يتحرَّك إلكترون من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل يتركُ فجوة أو **ثقبًا** Hole في حزمةِ التكافؤِ المملوءة بالإلكترونات، ولأن هذا الثقب يكوِّن مستوى طاقة خاليًا في حزمة التكافؤ، فإن إلكترون تكافؤ آخر، من الذرَّة نفسها أو من ذرَّة قريبة، يكون حرًّا في التحرُّك ليملأ الثقب. وحين يفعل إلكترون ذلك يتكوَّن ثقب في موقعه الأصليّ. وهكذا يمكنُ النظر إلى تلك الظاهرة على أنها تحرّك ثقب عبر المادَّة في اتجاهٍ معاكسٍ لاتجاهِ حركة الإلكترونات في حزمة التوصيل.

في مادَّة مكوَّنة من عنصرٍ أو مركَّب واحد، يوجدُ العدد نفسه من إلكتروناتِ التوصيل والثقوب. تُسمّى مجموعات الشحنات تلك *أزواج الإلكترونات الثقوب*. ويسمّى شبه الموصّل الذي يحتوي على مثل تلك الأزواج *شبه موصِّل أصيل*. **الشكل 9-6** رسم تمثيليّ لشبه موصِّل أصيل. عندَ تطبيقِ مجال كهربائي تتحرَّك الثقوبُ في اتّجاه المجال بينما تتحرَّك الإلكترونات في عكسِ اتّجاه المجال. تذكَّر أن الثقوبَ تتحرَّك دائمًا في الاتجاه المعاكس لاتّجاه حركةِ الإلكترونات.



الشكل 9-6

يمكن لمجال كهربائي أن يستثير إلكترونات تكافؤ إلى حزمة توصيل، حيث يمكنها أن تتحرك بحرية عبر المادَّة. عندئذ يمكن للثقوب في حزمة التكافؤ أن تتحرك في الاتّجاه المعاكس.

الإشابة تضيف شوائب تعزِّز التوصيل

أوضحنا في القسم السابق أن تركيز حاملات الشحنة (أي عددها بوحدة الحجم) في شبه الموصِّل يعتمدُ على درجة الحرارة. توجد طريقة أخرى لتغيير تركيز حاملات الشحنة، تتمثّل بإضافة شوائب إلى شبه موصِّل أصيل. والشوائب هي ذرّات مختلفة عن ذرّات شبه الموصِّل الأصيل.

الإشابة

إضافة ذرّات شائبة إلى شبه الموصِّل.

تسمّى إضافة الشوائب **الإشابة** Doping. تكفي ذرّات معدودة من شائبة (حوالي جزء واحد من المليون) لإحداث تغيير كبير في مقاومة شبة الموصِّل. تزداد موصِّليّة شبه الموصِّل بازدياد مستوى الإشابة. حين تسيطر الشوائب على التوصيل تسمى المادّة حينئذ *شبه موصّل دخيلاً*. توجد طريقتان لإشابة شبه موصِّل: إمّا إضافة شوائب فيها إلكترونات تكافؤ زائدة، وإمّا إضافة شوائب فيها إلكترونات تكافؤ ناقصة، بالمقارنة مع ذرّات شبه الموصِّل الأصيل.

إن أشباه الموصِّلات المستعملة في الأجهزة التجارية مكوَّنة من سيليكون أو جرمانيوم أضيف إليهما شوائب. فلكلٍّ من هذين العنصرَيْن أربعة إلكترونات تكافؤ. تتمُّ عمليةُ إشابة أشباه الموصِّلات باستبدالِ ذرَّة تحتوي على ثلاثة إلكترونات تكافؤ أو خمسة إلكترونات تكافؤ، بذرّة السيليكون أو الجرمانيوم. يكون شبه الموصِّل المشوب متعادلاً، لأنه مكوَّن من ذرّات متعادلة. تبقى ذرّات شبه الموصِّل وذرّات الشائبة غير مشحونة وكما كانت من قبل، فلا يختلُّ التوازن بين الشحنات الموجبة والشحنات السالبة. لكن عدد الشحنات التي تكونُ حرَّة وقادرة على التحرُّك يزداد. وهي شحنات تكون قادرة على المساهمة في التوصيلِ الكهربائيّ.

هل تعلم؟

إنّ متوسِّط الطاقة الحرارية لإلكترون عند درجة حرارة الغرفة (22°C) هو حوالي 0.025 eV.

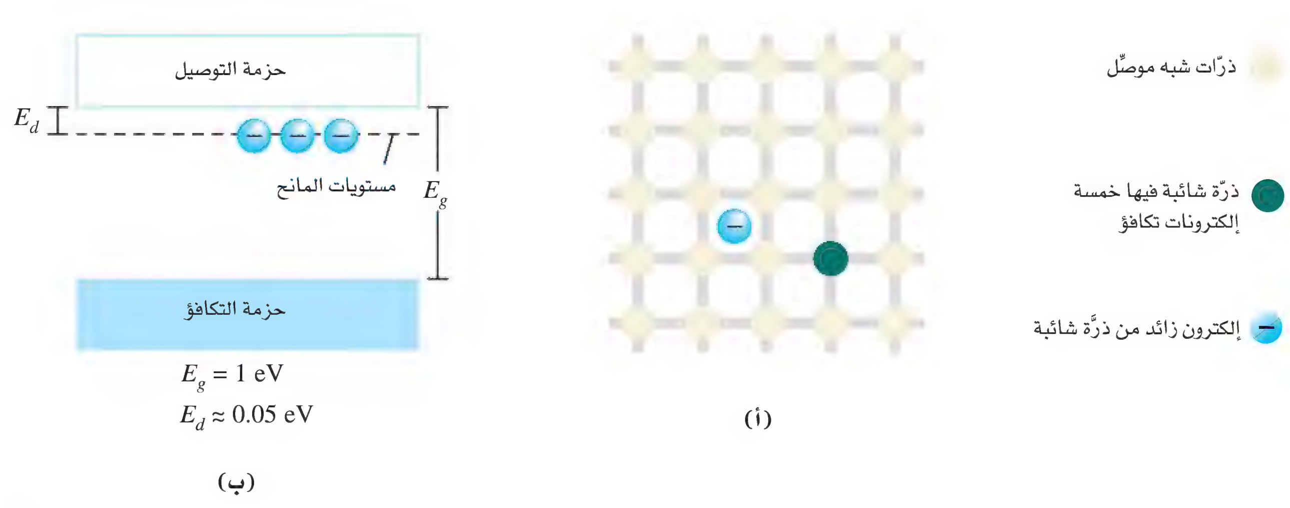
في شبه الموصّل من صنف n تشكّل الإلكترونات أكثرية حاملات الشحنة

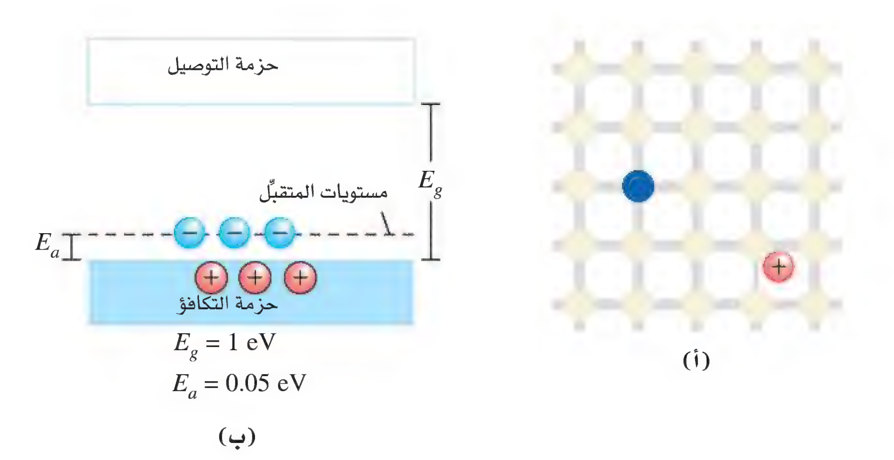
في **الشكل 9-7** (أ) أضيفت ذرَّة فيها خمسة إلكترونات تكافؤ، ذرَّة زرنيخ مثلاً، إلى شبه موصِّل. تشارك أربعة إلكترونات تكافؤ في تكوين الروابط بين الذرّات المتجاورة، ويبقى إلكترون واحد. منحت شائبة كهذه إلكترونًا زائدًا للذرَّة، لذلك هي تسمى *ذرّة مانحة*. تُبدِّلُ الشائبة بنيةَ حزمة الجسم الصلب. يشغل الإلكترون الزائد مستوى طاقة، أو مستوى المانح، يقع أسفل حزمة التوصيل وفي فجوة الطاقة كما هو مبيّن في **الشكل 9-7** (ب).

تكون الفواصل بين مستويات المانح وأسفل حزمة التوصيل صغيرة جدًّا (حوالي 0.05 eV). هكذا يكفي مقدار صغير من الطاقة الحرارية لجعل إلكترون في مستويات المانح ينتقل إلى حزمة التوصيل. تسمى أشباه الموصِّلات المشوبة بذرّات مانحة *أشباه موصّلات صنف n*، لأن معظم حاملات الشحنة هي إلكترونات ذات شحنة سالبة. لا تتحرَّك الثقوب الموجبة المكوّنة في مستوى المانح بسهولة.

الشكل 9-7

يكون شبه الموصّل صنف n مشوبًا بذرّات شائبة فيها إلكترونات تكافؤ زائدة.





ذرّات شبه موصِّل

ذرّة شائبة لها ثلاثة إلكترونات تكافؤ

ثقب أو إلكترون ناقص في رابطة

الشكل 9-8

شبه موصّل صنف p مشوب بذرّات إشابة ذات إلكترونات تكافؤ قليلة.

في شبه الموصّل صنف p تشكِّل الثقوب أكثرية حاملات الشحنة

إذا كان شبه الموصِّل مشوبًا بذرّات تحتوي على ثلاثة إلكترونات تكافؤ، مثل الإنديوم والألمنيوم، تشكِّل الإلكترونات الثلاثة روابط مع الذرّات المجاورة في شبه الموصّل صنف p. هذا يترك نقصًا في إلكترون واحد، أو ثقبًا، في الرابطة الرابعة، وكما هو مبيّن في **الشكل 9-8** (أ). تكون مستويات طاقة شوائب كهذه، أو مستويات المتقبّل، فوق حزمة التكافؤ مباشرة، وفي فجوة الطاقة كما هو مبيّن في **الشكل 9-8** (ب).

يكون لدى إلكترونات حزمة التكافؤ طاقة حرارية كافية عند درجة حرارة الغرفة لكي تملأ مستويات المتقبِّل، تاركة ثقوبًا في حزمة التكافؤ. يمكن لهذه الثقوب أن تُملأ بإلكترونات قريبة منها، تتركُ بدورِها ثقوبًا مكانها. هكذا يمكن للشُّحنات الموجبة، أي الثقوب، أن تتحرَّك عبر المادّة حتى لو لم تكن توجد إلكترونات في حزمة التوصيل.

لأن هكذا شوائب تتقبَّل إلكترونًا من حزمة التكافؤ، يشار إليها على أنّها متقبِّلات. يعرف شبه الموصِّل الذي يحتوي على متقبِّلات بشبه الموصِّل صنف p، لأن أكثرية حاملات الشحنة فيه هي ثقوب ذات شحنة موجبة.

البلوراتُ الثنائيّة (دايود)

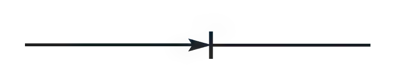
البلورة الثنائية Diode جهاز له مقاومة لامتناهية تقريبًا في اتجاه، وشبه معدومة في الاتّجاه الآخر، فالبلورة الثنائية قابلةٌ لتمريرِ التيار الكهربائي في اتّجاه واحد. تسمّى البلورة الثنائية المستعملة بهذا الشكل *مقوِّمًا*. يبيّن **الشكل 9-9** رمز البلورة الثنائية في ترسيم الدائرةِ الكهربائيّة. يدلُّ السهمُ في الرمز على اتّجاه التيّار الكهربائي في البلورة الثنائية (دايود).

البلّورة الثنائية

جهاز إلكتروني يسمح للتيّار الكهربائي بالمرور بسهولة في اتّجاه واحد بالمقارنة مع الاتجاه الآخر.

وصلة p-n هي التماس بين شبه موصّل صنف p وشبه موصّل صنف n

لننظر في ما يحدث حين يتلامس شبه موصّل صنف p مع شبه موصِّل صنف n لتكوين *وصلة p-n*. يمكن استعمال جهاز فيه وصلة p-n كبلورة ثنائية في الدوائر الكهربائيّة. سوف تسمح البلورة الثنائية بمرور التيّار الكهربائي في اتّجاه واحد، لأن الثقوب والإلكترونات على جانبَي وصلة p-n يمكنها النزوح عبر الوصلة.



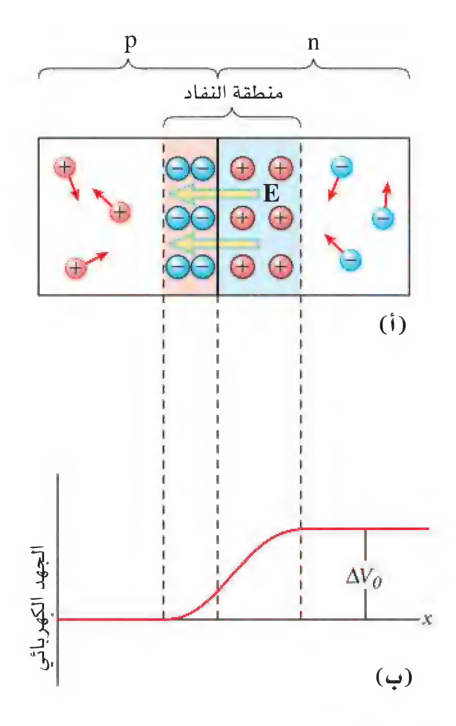
الشكل 9-9

يدلّ رمز البلورة الثنائية المستعمل في ترسيم الدائرة الكهربائيّة على أنه يسمح للتيّار الكهربائي بالمرور في اتّجاه واحد.

وحين تفعل ذلك، فإنَّ الإلكترونات والثقوب تكوّن حاجزًا جهديًّا (حقلاً كهربائيًّا داخليًّا) يسمح للشحنة الكهربائيّة بالتدفُّق باتّجاه محدَّد، وليس في الاتّجاه الآخر. تعالوا لتفحّص هذه الظاهرة بمزيد من التفصيل.

تذكر أن شبه الموصِّل صنف n فيه إلكترونات حرّة، وأن شبه الموصِّل صنف p فيه ثقوب حرّة. وعندما يلتصق شبه الموصِّل صنف n بشبه موصِّل صنف p لتكوين وصلة p-n تتحرَّك تلك الشحنات الحرَّة الموجبة والسالبة بفعل طاقتها الحرارية فتنتقل الإلكترونات من الجهة n القريبة من الوصلة، المنطقة الزرقاء في **الشكل 9-10** (أ)، باتّجاه الجهة p، تاركة وراءها أيونات موجبة ثابتة في مكانها من الجسم الصلب. وبالطريقة نفسها تنتقل ثقوب من الجهة p القريبة من الوصلة باتّجاه الجهة n، تاركة وراءها أيونات سالبة ثابتة. وحين تلتقي الشحنات السالبة بالشحنات الحرَّة الموجبة تلغي الواحدة منهما الأخرى وتزول حاملات الشحنة. بالنتيجة لا توجد حاملات شحنة متحرِّكة في المنطقة التي يتلامس فيها شبه موصِّل صنف n مع شبه موصِّل صنف p. لهذا السبب تسمّى تلك المنطقة *منطقة النفاد*. إن حجم منطقة النفاد ثابت، لأن وجود أيونات فيها يكوّن مجالاً كهربائيًّا يعاكس كلّ انتقال إضافي لإلكترونات ولثقوب يمكنُ أن يؤدّي إلى توسيع تلك المنطقة. يتّجه ذلك المجال الكهربائيّ الداخليّ من اليمين إلى اليسار في **الشكل 9-10** (أ).

على جانبي منطقة النفاد تقع المنطقة صنف p والمنطقة صنف n . هكذا فإن الوصلة p-n في البلورة الثنائية تتألَّف من ثلاث مناطق، كما هو مبيّن في **الشكل 9-10** (أ).



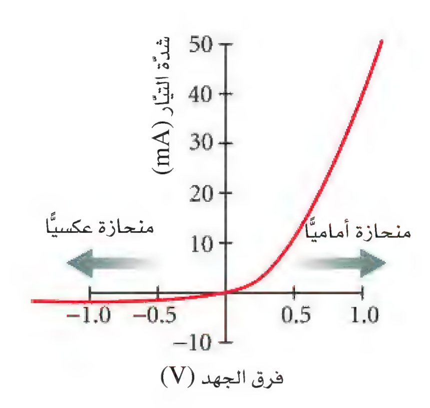
الشكل 9-10

ينشأ عن انتقال حاملات الشحنة عبر الوصلة p-n مجال كهربائيٌّ في منطقة النفاد.

البلورات الثنائيّة، تسمح بتحرُّك الشحنة في اتّجاه واحد فقط

يمكن فهم المناطق المختلفة للبلورة الثنائية عند النظر إلى المخطَّط البيانيّ للجهد الكهربائيّ في **الشكل 9-10** (ب). بسبب وجود المجال الكهربائيّ في منطقة النفاد ينبغي أن يكون الجهد الكهربائيَّ عند جانب من الوصلة أعلى مما هو عند الجانب الآخر. لا يمكن لحاملات الشحنة الموجبة أن تتحرَّك من اليسار إلى اليمين. إن حركة كهذه تتطلَّب طاقة إضافيّة مقدارها $q\cdot\Delta V_0$ للتغلُّب على المجال الكهربائيِّ الداخليِّ في منطقة النفاد. وللسبب نفسه لا يمكنُ لحاملاتِ الشحنةِ السالبةِ التحرُّك من اليمين إلى اليسار.

يمكن توفير الطاقة الزائدة اللازمة لتحريك حاملات الشحنة السالبة من اليمين إلى اليسار، باستعمال مصدر خارجيّ لفرق الجهد. إذا طبّق جهد خارجي موجب وكافٍ على الجانب p من الوصلة يزداد الجهد الكهربائي عند الجانب الأيسر (الموجب) بالمقارنة مع الجانب الأيمن (السالب). ولأن الجهد الكهربائي عند الجانب الأيسر أعلى مما هو عند الجانب الأيمن، فإن الشحنات سوف تتحرَّك مكوِّنة تيّارًا كهربائيًّا. حين توصّل بلورة ثنائية بمصدر خارجيّ لفرق الجهد بهذا الشكل يقال إن البلورة الثنائية *منحازة أماميًّا*. وحين يُطبَّق جهد خارجيّ موجب على الجانب n من الوصلة يزداد الحاجز الجهدي مما يؤدّي إلى تخفيض شدَّة التيّار في الوصلة، يُقال عن بلورة ثنائية كهذه أنها *منحازة عكسيًّا*.



الشكل 9-11

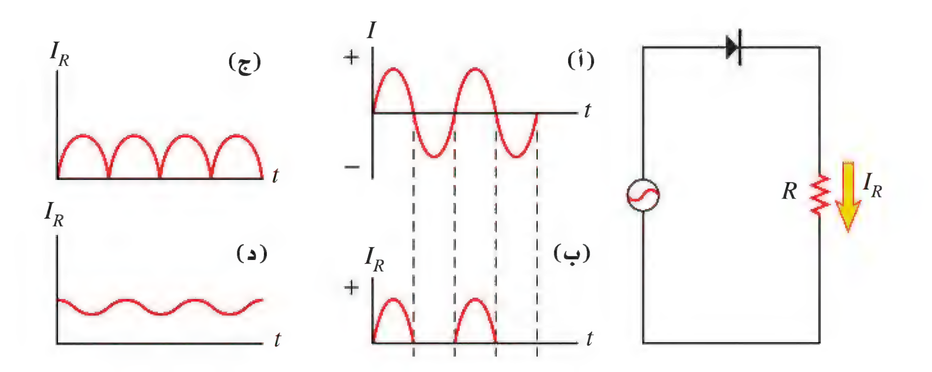
يساوي الميل عند أيّ نقطة من هذا المنحنى عكس مقاومة البلورة الثنائية عند فرق الجهد وشدّة التيّار المقصودَيْن.

يبيّن **الشكل 9-11** تمثيلاً بيانيًّا نموذجيًّا لشدّة التيّار في بلورة ثنائية بحسب فرق الجهد عبر تلك البلورة. لاحظ أن البلورة الثنائية لا تخضع لقانون أوم. فبحسب قانون أوم سيكون التمثيل البياني لشدّة التيّار بدلالة فرق الجهد خطًّا مستقيمًا له ميل يساوي عكس المقاومة. نلاحظ من جهة أخرى أن مقاومة البلورة الثنائية ليست ثابتة. حين تكون البلورة الثنائية منحازةً عكسيًّا يكون المنحنى أفقيًّا تقريبًا، أي أن المقاومة لامتناهية في الواقع. (من الملاحظ أن شدّة التيّار سالبة في هذه الحالة. تدلُّ هذه الحقيقة على أنّ *تيّار التسرّب ضعيف* ولايزال يتدفّق في الاتجاه «الخطأ» في حالة البلورة الثنائية المنحازة عكسيًّا. وبما أن التيّار المتسرِّب ضعيف جدًّا فسوف نهمل وجوده.) حين تكون البلّورة الثنائية منحازة أماميًّا تتغيَّر المقاومة، وتقارب الصفر حين تكون شدَّة التيّار كبيرة جدًّا. نلاحظ أن القيمة القصوى لفرق الجهد على مدى البلورة الثنائية وفي حالة الانحياز الأماميّ، تكون صغيرة (حوالي 0.5–0.8 V).

استعمال البلورات الثنائيّة لتحويل التيّار المتناوب إلى تيّار مستمرّ

يبيّن **الشكل 9-12** تأثير البلورة الثنائية على فرق جهد متناوب. يمثِّلُ **الشكل 9-12** (أ) شدَّة التيّار الناتج عن المولِّد بغياب البلورة الثنائية. ويمثِّل **الشكل 9-12** (ب) شدَّة التيّار في المقاوم وبوجود البلورة الثنائية. فقط الجزء الموجب من شدَّة التيّار يبقى لأن البلورة الثنائية تكون منحازة أماميًّا في تلك الفترات، وتكون مقاومتها ضئيلة جدًّا. وعندما تكون البلورة الثنائية منحازة عكسيًّا تكون مقاومتها كبيرة جدًّا. في هذه الحالة تلغي البلورة الثنائية الجزء السالب من شدَّة التيّار فتنعدم شدَّة التيّار في المقاوم. عملية تحويل التيّار المتناوب إلى تيّار مستمر تسمّى *التقويم*. حين تستعمل بلورة ثنائية واحدة كمقوِّم لا تكون شدَّة التيّار المستمرّ ثابتة بل على شكل نبضات. ويقال عن ذلك التيّار إنه *تيّار مستمرّ نابض*.

يمكن تكوين تيّار مستمرّ أكثر استقامة بدءًا من تيّار متناوب، وذلك بوضع أكثر من بلورة ثنائية واحدة وبعض المكثِّفات في دائرة التقويم. تسمح البلورة الثنائية الإضافية بتكوين المزيد من نبضات التيّار المستمرّ بين النبضات التي تسمح بها البلورة الثنائية الأولى، كما هو مبيَّن في **الشكل 9-12** (ج). يقوم المكثّف بدور *المرشِّح* الذي يزيد استقامة التيّار الناتج عن المقوّم. تخزِّن المكثّفات شحنة حين يُطبّق فرق جهد وتصدر شحنة حين لا يوجد فرق جهد. إذًا تُبقي المكثِّفات التيّار مستمرًّا في الدائرة الكهربائيّة كما هو مبيَّن في **الشكل 9-12** (د).



الشكل 9-12

تُقوِّم البلورة الثنائية التيّار المتناوب (أ) إلى تيار مستمر نابض (ب) إذا أضفنا بلورات ثنائيّة أخرى إلى الدائرة، تزداد النبضات في الإشارة (ج). يمكن أن استعمال المكثّفات كمرشّحات لجعل شدّة التيّار أكثر استقامة (د).

الترانزيستورات

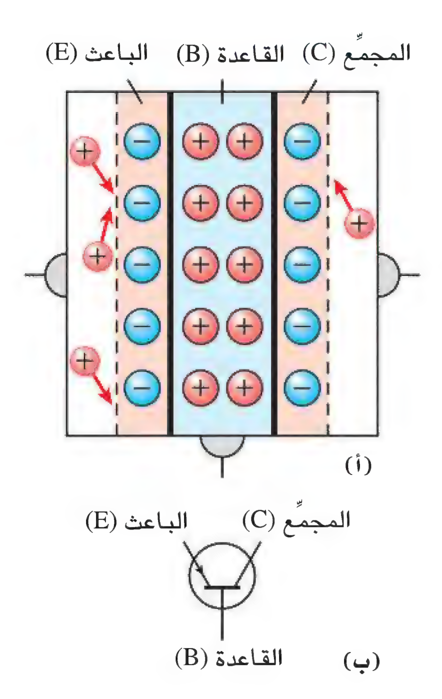
الترانزيستور Transistor جهاز إلكتروني أكثر تعقيدًا من البلورة الثنائية، ويُستعمل في تطبيقات كثيرة. تحتوي الترانزيستورات على وصلتَي p-n بدلاً من وصلة واحدة. في هذا القسم سوف تتعلّم كيف يمكن استعمال الترانزيستور لتضخيم إشارة. تعود خاصّية الترانزيستور تلك إلى طبيعة وصلة p-n.

الترانزيستور

جهاز له عادة ثلاثة أسلاك للتوصيل ويمكنه تضخيم إشارة.

توجد عدّة أنواع من الترانزيستورات، لكن النوع الذي نهتم به هنا هو *الترانزيستور الوصلي*. يتشكّل الترانزيستور الوصلي المبيّن في **الشكل 9-13**(أ) من مادّة شبه موصّلة فيها منطقة ضيقة صنف n محصورة بين منطقتَيْن صنف p. تُسمّى هذه التشكيلة *ترانزيستور p-n-p*. توجد تشكيلة أخرى تُسمّى *ترانزيستور n-p-n*، وتتشكّل من منطقة صنف p محصورة بين منطقتَيْن صنف n. وبما أن طريقة عمل الترانزيستورَيْن هي نفسها في الأساس، فسوف نصف فقط الترانزيستور p-n-p.

يبيّن **الشكل 9-13** بنية الترانزيستور p-n-p بالإضافة إلى رمز دائرته الكهربائيّة. إن وجود رأس السهم على الباعث في **الشكل 9-13**(ب) ضروري للتمييز بين الترانزيستور p-n-p والترانزيستور n-p-n. ففي رمز الترانزيستور n-p-n يكون السهم في الاتجاه المعاكس. تسمى المنطقتان عند طرفَي الترانزيستور *الباعث والمجمِّع* بينما تسمّى المنطقة الضيقة الوسطى منه *القاعدة*. لاحظ أن الترانزيستور الوصلي يحتوي على وصلتي p-n هما وصلة الباعث – القاعدة ووصلة المجمِّع– القاعدة. يكون الباعث عادة مشوبًا أكثر من القاعدة. وهكذا يكون عدد حاملات الشحنة في الباعث أكبر مما هو في القاعدة. وبخلاف المكوّنات الكهربائيّة الأخرى، فإن للترانزيستور ثلاثة أسلاك للتوصيل بدلاً من اثنين.

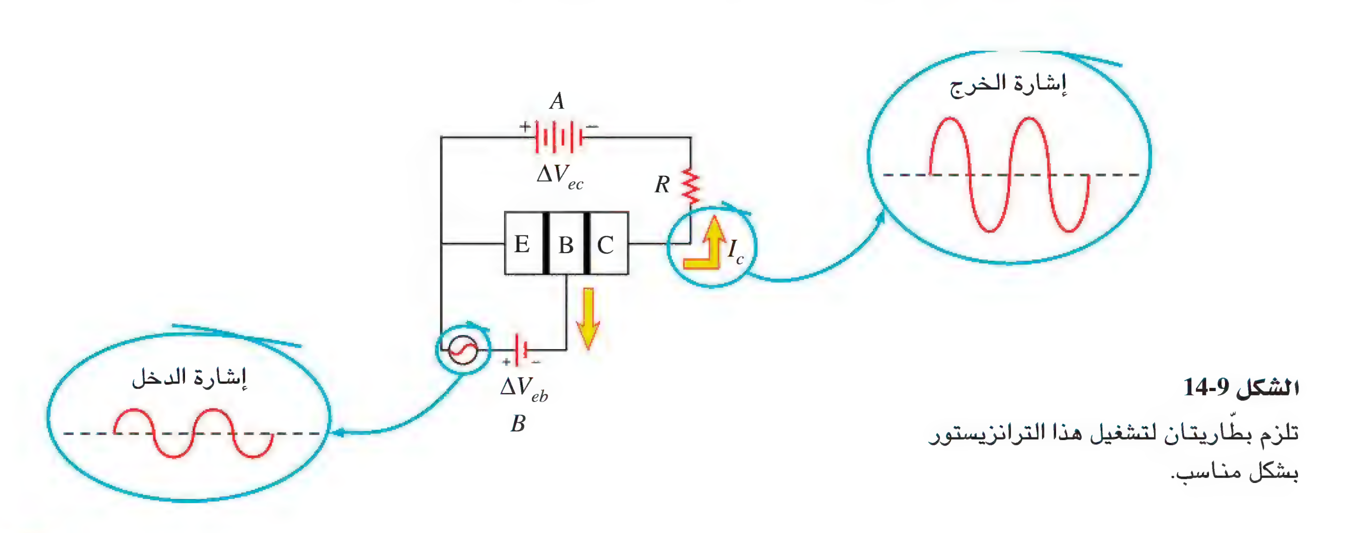


الشكل 9-13

(أ) يتشكّل الترانزيستور p-n-p من شبه موصّل صنف n محصور بين شبه موصّلَيْن صنف p. (ب) رمز الدائرة الكهربائيّة لذلك الترانزيستور له ثلاثة أسلاك للتوصيل.

ضبط فرق الجهد مهمّ جدًا لتشغيل الترانزيستور

عندما يُطبَّقُ فرقُ جهد (ΔV_{ec}) بين الباعث والمجمِّع يكون الجهد الكهربائي عند الباعث أعلى مما هو عند المجمِّع وكما هو مبيّن عند النقطة A من **الشكل 9-14**. ويكون الجهد الكهربائي عند القاعدة بين الجهد الكهربائي للباعث والجهد الكهربائي للمجمِّع بوساطة فرق الجهد (ΔV_{eb}) عند النقطة B. تذكّر من مناقشتنا لموضوع البلورات الثنائيّة الأمر التالي: حين تكون المنطقة p عند جهد كهربائي أعلى ممّا هو



الشكل 9-14

تلزم بطّاريتان لتشغيل هذا الترانزيستور بشكل مناسب.

عند المنطقة n من وصلة p-n، تكون تلك الوصلة في حالة انحياز أمامي. وإذا نظرنا إلى الترانزيستور وكأنه بلورتان ثنائيتان موصّلتان الظهر إلى الظهر تكون وصلة الباعث – القاعدة منحازة أماميًّا وتكون وصلة القاعدة – المجمّع منحازة عكسيًّا. ويعتبر هذا الانحياز الخاص للوصلتين في الترانزيستور ضروريّ لتشغيله.

هل تعلم؟

إن اكتشاف الترانزيستور على أيدي جون باردين وولتر بريتين ووليم شوكلي في العام 1948 أحدث ثورة في عالم الإلكترونيات وتقديرًا لهذا العمل نال العلماء الثلاثة جائزة نوبل للفيزياء في العام 1956.

يمكن استعمال الترانزيستور الوصلي كمضخّم

يمكننا الآن أن نرى كيف يمكن للترانزيستور تضخيم إشارة. لننظر أوّلاً إلى وصلة الباعث – القاعدة. إنها منحازة أماميًّا، وهكذا يدخل التيّار إلى الترانزيستور عبر سلك توصيل الباعث، وتتدفّق الشحنة بسهولة عبر وصلة الباعث – القاعدة. ولأن الباعث يكون مشوبًا جدًّا، بالمقارنة مع القاعدة، يكون التيّار بمعظمه مكوَّنًا من ثقوب تتحرَّك من الباعث وهو من الصنف p، إلى القاعدة. إلكترونات قليلة تتحرَّك من القاعدة إلى الباعث. بالإضافة إلى ذلك لا تتّحد معظم الثقوب مع الإلكترونات في القاعدة، لأن القاعدة ضيقة جدًّا.

على الرغم من أن عددًا صغيرًا من الثقوب يتّحد مع إلكترونات في القاعدة، فإن الثقوب التي تتّحد مع إلكترونات تحدُّ من شدَّة التيّار الذي يمكن أن يمرَّ من الباعث إلى المجمِّع عبر القاعدة. ذلك أن حاملات الشحنة الموجبة تتجمّع في القاعدة، وتمنع الثقوب من التدفُّق عبرها.

بعد أن تجتاز الثقوب المتبقية القاعدة، تلتقي وصلةَ القاعدة – المجمّع. تكون هذه الوصلة منحازة عكسيًّا، ومن الطبيعي ألاّ يوجد تيّار كهربائي في تلك المنطقة. إن عائق القاعدة – المجمِّع، بالإضافة إلى منطقة النفاد الخاصة به، يمنع الإلكترونات من التحرُّكِ إلى اليمين، ويمنع الثقوب من التحرُّك إلى اليسار. لكن في هذه الحالة تكون الثقوب موجودة في الجانب n من الوصلة، حيث تكون الإلكترونات عادة هي حاملات الشحنة. هكذا يكون للعائق تأثير معاكس على حركة الثقوب إلى اليمين، إذ تتسارع الثقوب عبر وصلة القاعدة – المجمّع المنحازة عكسيًّا.

إن تغيّرًا طفيفًا في خواص القاعدة قد يكون له تأثير كبير على حركة الشحنة من الباعث إلى المجمِّع. والطريقة المباشرة لإحداث هذا التغيير تكون بتوصيل القاعدة بمصدر ثانٍ لفرق الجهد والمعَنْوَن ΔV_{eb}، كما عند النقطة B في **الشكل 9-14**. على الرغم من أن التيّار الصادر من هذا الباعث ضعيف، فإنه قد يجرّ معه بعض الشحنات الموجبة التي يمكن أن تتراكم في القاعدة. ينتج عن ذلك مرور المزيد من الشحنات من الباعث إلى المجمِّع عبر القاعدة. يوضع فرق الجهد الصغير الذي يُراد تضخيمه على التوالي مع تلك البطارية. تنتج إشارة الدخل تغيّرًا طفيفًا في شدَّة تيّار القاعدة، ينتج عنه تغيُّر كبير في تيّار المجمِّع، وبالتالي تغيُّر كبير في فرقِ الجهدِ عند المقاوم الخرج.

إذا كان الترانزيستور منحازًا كما ينبغي، تكون شدّة تيّار المجمّع (الخرج) متناسبة طرديًّا مع شدّة تيّار القاعدة (الدخل)، ويعمل الترانزيستور عندها كمضخّم لشدّة التيّار. يمكن كتابة العلاقة بين الخرج والدخل على النحو التالي:

$$I_c = \beta I_b$$

تُسمّى الكمّية β (بيتا) *كسب التيار*. يتراوح مقدار كسب التيار ما بين 10 و 100.

الدوائر الكهربائيّة المتكاملة

تشكّل الدوائر الكهربائيّة المتكاملة أساس أجهزة الحاسوب والساعات والكاميرات والسيارات والطائرات والمركبات الفضائيّة والرجل الآلي، وكلّ أنواع الاتصالات والشبكات العنكبوتية.

الدائرة الكهربائيّة المتكاملة هي ببساطة مجموعة مترابطة من الترانزيستورات والبلورات الثنائيّة والمقاومات والمكثّفات المصنوعة في قطعة واحدة من السيليكون، تعرف باسم *رقاقة*. تحتوي الرقاقات المتوافرة حاليًّا على مئات الآلاف من المكوّنات في مساحة ضيّقة جدًّا كما هو مبيّن في **الشكل 9-15**.

اخترعت الدوائر الكهربائيّة المتكاملة بغية إنتاج دوائر كهربائيّة مصغّرة، بالإضافة إلى حلّ مسألة التوصيل التي فرضها وجود الترانزيستورات. قبل اختراع الترانزيستورات كان حجم المكوّنات ومصادر الطاقة يحدّ من عدد المكوّنات التي يمكن توصيلها ضمن دائرة كهربائيّة معيّنة. ومع تطوير الترانزيستور الدقيق، والمنخفض الطاقة، تمَّ خفض عدد المكوّنات. لكن برزَت مسألة توصيل المئات، لا بل الآلاف، من المكوّنات بعضها ببعض. يبيّن الشكل **9-16** رسمًا تخطيطيًّا لواحد من الأنواع الأولى للدوائر الكهربائيّة المتكاملة، وهو المضخّم العملياتي.

تُستعمل المضخّمات العملياتيّة أو *op amps* وبشكل واسع في الإلكترونيات الأساسيّة مثل الجمع والضرب. الأعداد التي تشملها هذه العمليات هي قيم فرق الجهد الدخل وفرق الجهد الخرج.

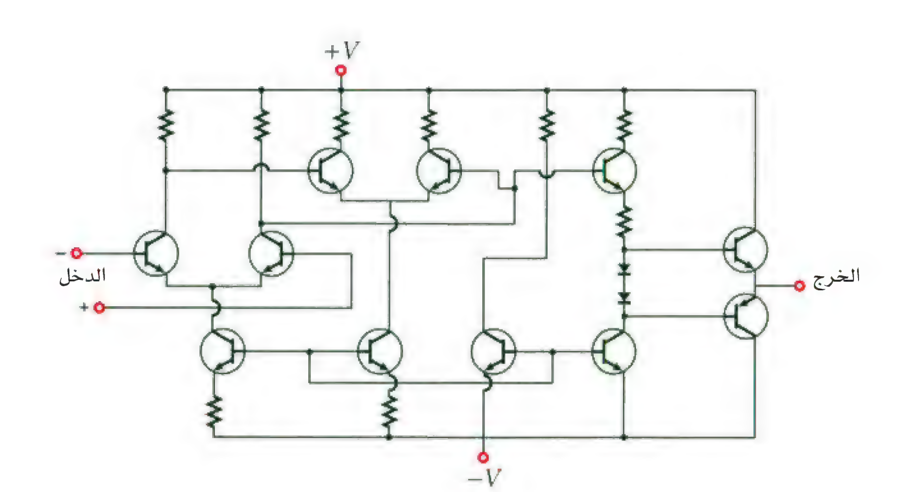
مثلاً في إحدى التشكيلات ينتج عن دخل واحد في مضخم عملياتي خرج واحد. وتساوي شدّة فرق الجهد للخرج شدَّة فرق الجهد للدخل مضروبة في كسب الجهاز.

وفي تشكيلة أخرى تكون عدّة فروق جهد مطبّقة كمدخولات على مضخّم عملياتي. تكون النتيجة خرجًا واحدًا له فرق جهد تساوي شدّته مجموع شدّة كل فروق الجهد الدخل.



الشكل 9-15

على الرغم من أن رقاقة ذاكرة الحاسوب هذه أصغر من السنت، فإن بإمكانها أن تخزّن أكثر من مليون وحدة رقمية.



الشكل 9-16

رسم تخطيطي مبسّط لمضخم عملياتي، وهو أحد الأنواع الأولى للدوائر الكهربائيّة المتكاملة. لاحظ أعداد المقاومات والبلّورات الثنائية والترانزيستورات والتوصيلات المستعملة لتكوين هذه الدائرة.

هل تعلم؟

إن الدوائر الكهربائية المتكاملة قد اخترعها العالِم جاك كيلبي في أواخر العام 1958 والعالم روبرت نويس في أوائل العام 1959. وقد عمل هذان العالمان كلّ على حدة وفي مختبرين مختلفين.

فضلاً عن أن الدوائرَ الكهربائيةَ المتكاملةَ تحلُّ مسألةَ التوصيل، فإن من فوائدِها الاستجابة السريعة ومن ميزاتِها الحجم الصغير جدًّا. هاتان السمتان مهمّتان في تشغيلِ الحاسوبِ الفائقِ السرعة. تَنتجُ الاستجابةُ السريعةُ عن تصغيرِ حجمِ المكوِّنات وتقاربِها. يعتمدُ زمنُ استجابة دائرةٍ كهربائيّةٍ على الزمنِ الذي تستغرقُه إشاراتٌ كهربائيّةٌ تنتقلُ بسرعة 0.3 m/ns لكي تعبرَ من مكوّنٍ إلى آخر. يُختصرُ هذا الزمنُ بجعلِ المكوِّناتِ أكثرَ تقاربًا. ولا تزال هذه الإيجابيات تتوالى عبرَ تشكيلِ ترتيباتٍ جديدةٍ من المعالِجاتِ التي تسمح للحاسوبِ بتجزئةِ العملياتِ الحسابيةِ المعقّدةِ إلى أجزاءٍ متعدِّدة. أصبحَت الحواسيبُ أصغرَ حجمًا وأسرعَ في تأديةِ العمليات. ففي العام 1997 اختُرعَ حاسوبٌ كان بمقدورِه أداء أكثر من تريليون عمليةٍ حسابيةٍ في الثانيةِ الواحدة.

مراجعةُ القسم 2-9

1. أيّ ممّا يلي معادل لتيّار كهربائي ينتقل من اليسار إلى اليمين وفق الاتجاه المتفق عليه؟

أ. إلكترونات تنتقل من اليسار إلى اليمين.

ب. إلكترونات تنتقل من اليمين إلى اليسار.

ج. ثقوب تنتقل من اليسار إلى اليمين.

د. ثقوب تنتقل من اليمين إلى اليسار.

2. وضّح لماذا لا يُشترط أن يكون شبه الموصّل صنف n مشحونًا سلبيًّا؟

3. ما نوع الشحنة الثابتة السائد في منطقة النفاد لشبه موصّل صنف p عند الوصلة p-n؟

4. بلّورة ثنائية موصّلة بمصدر تيّار متناوب. تتردّد شدّة تيّار المصدر ما بين 1.0 mA– و 1.0 mA. كم يبلغ مدى التيّار المقوّم؟

5. إذا انخفضت شدّة التيّار في سلك توصيل قاعدة ترانزيستور، فكيف سيؤثّر ذلك في شدّة التيّار الخرج في سلك توصيل المجمّع؟

6. تُستعمل الترانزيستورات بشكل واسع في أجهزة الراديو وفي الميكروفونات كمضخّمات. مردّ ذلك أن إشارة الراديو الآتية من الهوائي تشكّل تيّارًا تكون شدّته عدّة ميكرو أمبير. ولكي يعمل مكبِّر الصوت بشكل جيد ينبغي أن تكون شدّة التيّار حوالي 0.1 A.

أ. إذا استعمل ترانزيستور لتضخيم إشارة 2.5 μA إلى 0.1 A على الأقل، فكم ينبغي أن يكون الحدّ الأدنى لكسب دائرة الترانزيستور؟

ب. افترض أن المضخّم مكوّن من عدد من الترانزيستورات الموصّلة على التوالي، وكسب كل واحد منها يساوي 10. ما عدد الترانزيستورات اللازمة؟ (ملاحظة: إنَّ كسب اثنين من هذه الترانزيستورات موصّلين على التوالي هو : $10 \times 10 = 100$).



الموصّلات الفائقة التوصيل

Superconductors

9-3 أهداف القسم

- يحدّد سبب المقاومة الكهربائية لبعض الموصّلات عند درجة حرارة الصفر المطلق.
- يوضح نظرية باردين – كوبر – شريفر (BCS) للموصّلية الفائقة.
- يصف بعض تطبيقات الموصّلية الفائقة.

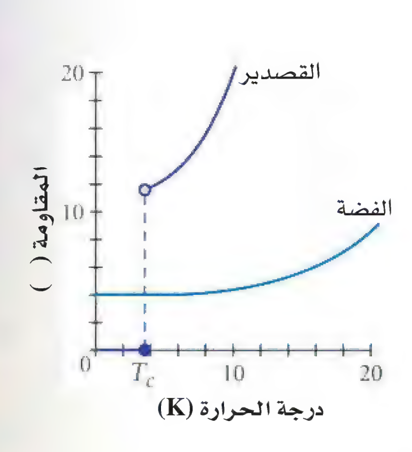
درجة الحرارة والموصليّة

عرفنا في درس سابق أن المقاومة الكهربائية للكثير من الأجسام الصلبة، من غير الأجسام شبه الموصّلة، تزداد بارتفاع درجة الحرارة. يعود ذلك إلى أن الذرّات في الأجسام الصلبة، وعند درجات حرارة غير الصفر المطلق، تكون في حركة اهتزاز دائمة. وكلما ارتفعت درجة الحرارة تزداد سعة تلك الاهتزازات. تزداد صعوبة حركة الإلكترونات في الجسم الصلب عندما تكون سعة اهتزازات الذرّات كبيرة. يشبه ذلك التنقُّل في غرفة مكتظة بالناس. يكون من الأصعب التنقل حين يكون الناس متحرِّكين مما هو حين يكونون ثابتين في مواقعهم.

إذا كانت المقاومة الكهربائيّة تعتمد فقط على اهتزازات الذرّات، يمكننا التوقُّع أن مقاومة مادّة تمَّ تبريدها حتى درجة الصفر المطلق تقارب الصفر فتبدأ عندها حالة الموصلية الفائقة. لكن التجارب بيَّنت أن ذلك لا يحدث. بالحقيقة تتصرَّف مقاومة الكثير من الأجسام الصلبة المبرّدة بطريقتَيْن مختلفتَيْن. فإما أن تصبح المادّة فجأة فائقة التوصيل عند درجات حرارة أعلى من الصفر المطلق، وإما أنها لا تصبح فائقة التوصيل مهما تكن درجة تبريدها.

تسبّب عيوب الشبكة البلوريّة مقاومة في بعض المواد

يبيِّن الرسم البياني في **الشكل 9-17** العلاقة بين المقاومة ودرجة الحرارة لجسمين متشابهين، أحدهما من الفضّة والثاني من القصدير. إن تغيُّر مقاومة الجسم المصنوع من الفضّة مع تغيُّر درجة الحرارة، مشابه لما يحدث للفلزّ النموذجي. فعند درجات الحرارة المرتفعة تنخفض المقاومة حين يبرّدُ الجسم. ذلك يفترض أن سعة اهتزازات الشبكة البلوريّة تنخفض، وكما هو متوقّع. لكن عند درجة الحرارة 10 K تقريبًا تصبح المقاومة ثابتة. فالتبريد الإضافي للفلز لا يخفض المقاومة بشكل ملموس، على الرغم من انخفاض سعة اهتزازات الذرّات.



الشكل 9-17

تظهر مقاومة الفضة تصرّفًا مشابهًا لتصرّف الفلز العادي. أما مقاومة القصدير فتقارب الصفر عند درجة الحرارة T_c ، وهي درجة الحرارة التي يصبح عندها القصدير فائق التوصيل.

يعود السبب في إن المقاومة لا تنعدم كليًّا عند درجة حرارة الصفر المطلق، إلى عيب *الشبكة البلورية*. فقد يكون النمط المنتظم للشبكة البلوريّة مصابًا بخلل ما. ينشأ العيب في الشبكة البلورية حين لا تكون الذرّات منتظمة تمامًا في خطٍّ مستقيم.

تخيّل أنك تسير في غرفة مكتظة بأشخاص واقفين في صفوف منتظمة. عندها يكون من السهل عليك أن تسير عبر الغرفة بين صفَّيْن. تخيّل الآن أن شخصًا قد جاء مصادفة ولم يقف في الصف تمامًا، عندها يصعب عليك المرور. هذا مشابه لتأثير العيب في الشبكة البلوريّة. حتى في غياب الاهتزازات الحرارية يكون لبعض المواد *مقاومة متبقيّة* تعود إلى عيوب في اصطفاف الذرّات.

يبيّن **الشكل 9-17** أن مقاومة القصدير تقارب الصفر عند درجة حرارة هي أعلى قليلاً من الصفر المطلق. يسمّى الجسم الصلب الذي تكون مقاومته معدومة عند درجة حرارة ليست صفرًا مطلقًا الموصّل *الفائق التوصيل*. وتسمّى درجة الحرارة التي تقارب عندها المقاومة الصفر درجة *الحرارة الحرجة* للموصِّل الفائق التوصيل.

هل تعلم؟

اكتشفت الموصلية الفائقة في العام 1911 على يد عالم الفيزياء الألماني أوميز Ommes بينما كان يدرس وتلميذه مقاومة الزئبق عند درجات الحرارة المنخفضة. نال أوميز جائزة نوبل للفيزياء في العام 1913.

نظرية باردين-كوبر-شريفر (BCS)

قبل اكتشاف الموصّلية الفائقة كان يُعتقد أن جميع المواد تمتلك بعض المقاومة بسبب اهتزازات الشبكة البلورية وعيوبها. ويبيّن ذلك تصرّف الفضّة في **الشكل 9-17**.

لكن أوّل نظرية مجهرية كاملة للموصلية الفائقة ظهرت في العام 1957، أي حوالي نصف قرن بعد اكتشاف ظاهرة الموصلية الفائقة. سُمّيت هذه النظرية *نظرية BCS* نسبة إلى الحرف الأول من أسماء العلماء الثلاثة الذين وضعوا هذه النظرية وهم: جون باردين، وليون كوبر، وروربرت شريفر. كان التقدُّم الحاسم في نظرية BCS في الرؤية الجديدة للطريقة الخاصة التي تنتقل بها الإلكترونات أزواجًا خلال الشبكة البلورية لشبه الموصّل. فبناءً على نظرية BCS تتعرّض الإلكترونات لاصطدامات في الموصّل الفائق التوصيل، تمامًا كما يحدث في المواد الأخرى. لكن الاصطدامات لا تغيّر الزخم الخطّي لزوجي الإلكترونات. ونتيجة ذلك تتحرّك الإلكترونات بطريقة غير منفصلة عبر الشبكة البلوريّة.

تخيّل أن إلكترونًا يتحرّك عبر شبكة إلكترونيّة، مثل الإلكترون 1 في **الشكل 9-18**. توجد قوّة جذب بين الإلكترون والأيونات القريبة في الشبكة البلوريّة، وذات الشحنة الموجبة. حين يمرُّ إلكترون بالقرب من أيونات الشبكة البلورية تنجذب الأيونات، بفعل قوّة التجاذب، باتجاه الإلكترون. فينتجُ عن ذلك تركيز للأيونات الموجبة بالقرب من الإلكترون. إذا وجد إلكترون ثانٍ قريب، فيمكن أن ينجذب إلى الشحنة الموجبة الزائدة في الشبكة البلورية قبل أن تعود الشبكة البلورية إلى حالة اتزانها. خلال عملية تغيير شكل الشبكة البلورية يتخلى الإلكترون الأول عن بعض زخمه الحركي. تجذب المنطقة التي تغيّر شكلها من الشبكة البلورية الإلكترون الثاني ناقلة إليه الزخم الخطي الزائد. ينتج من هذه العملية ذات الخطوتَيْن قوّة تجاذب ضعيفة بين الإلكترونَيْن ناجمة عن حركة الشبكة البلورية حين يتغيَّر سكّانها بفعل الإلكترون الأول. إن قوّة التجاذب بين هذين الإلكترونَيْن هي تفاعل إلكترون - شبكة بلورية - إلكترون، حيث تقوم الشبكة البلوريّة بدور الوسيط لقوَّة التجاذب. ينتقل الإلكترونان عبر الشبكة البلورية لجسم واحد يسمّى زوجَيّ كوبر. وبحسب نظرية BCS تكون أزواج كوبر هي المسؤولة عن الموصّلية الفائقة.

الشكل 9-18

يغيِّر الإلكترون الأول شكل الشبكة البلوريّة، ويؤثِّر تغيير الشكل هذا في الإلكترون الثاني. النتيجة المحصّلة وكأن الإلكترونين مترابطان معًا ترابطًا ضعيفًا. إن حالة ترابط بين إلكترونين كهذه تسمّى زوجَيْ كوبر.

إن وجود الموصّلية الفائقة عند درجات الحرارة المنخفضة جدًّا فقط يعود إلى أن الترابط بين أزواج كوبر ضعيف. فيمكن للحركات العشوائية الحراريّة في الشبكة البلورية أن تفكّ الترابط الضعيف بين أزواج كوبر. حتى عند درجات الحرارة المنخفضة جدًّا تتشكَّل أزواج كوبر، ثم تتلف، ثم تتشكَّل أزواج جديدة بوتيرة ثابتة، في الموادّ الفائقة التوصيل.

يبقى الزخم الخطّي لأزواج كوبر محفوظًا، وهي تتحرّك عبر الشبكة البلوريّة

بيّنت حسابات حول خصائص أزواج كوبر أن الزخم الخطّي الكلّي للإلكترونَيْن يساوي صفرًا إذا لم يُطبَّق مجال كهربائي خارجي. وعند تطبيق مجال كهربائي خارجي تتحرّك أزواج كوبر في الشبكة البلوريّة بفعل ذلك المجال. لكن يبقى الزخم الخطّي لمركز كتلة كلّ زوجي كوبر محفوظًا، أي له المقدار نفسه. هذه هي السمة الأساسيّة لأزواج كوبر التي تفسِّر ظاهرة الموصلية الفائقة. فإذا تشتّت إلكترون في اتجاه ، تشتّت شريكه، أي الإلكترون الثاني، أيضًا وبطريقة تحفظ الزخم الخطّي للإلكترونين ثابتًا. نتيجة لذلك لا يكون للتشتُّت الناجم عن شوائب الشبكة البلورية واهتزازاتها أي تأثير على أزواج كوبر.

تطبيقات على الموصلية الفائقة

لاحظنا سابقًا أن موادّ عدَّة، ولكي تصبح فائقة التوصيل، ينبغي تبريدها إلى درجة حرارة قريبة من الصفر المطلق. هذا يجعل من الصعب استعمال تلك الموصّلات الفائقة في الحياة اليوميّة، لأن تبريد الأجسام حتى درجات الحرارة المنخفضة تلك مكلف جدًّا. تطلّبت الموصّلات الفائقة التوصيل الأولى استعمال أحواض تبريد من الهيليوم السائل، وهو غاز نادر ومكلف، ومن الهيدروجين السائل، وهو عنصر شديد الانفجار.

لكن وجدت فئة جديدة من المواد تكون فائقة التوصيل عند درجات حرارة أعلى. فبعض المواد تصبح فائقة التوصيل عند درجات حرارة أعلى من 77 K وهي درجة غليان النيتروجين السائل. وهذا أمر مهمّ لأن النيتروجين متوفّر جدًّا في الهواء، وهو بالتالي غير مكلف. ولا يزال البحث جاريًا عن مواد تكون فائقة التوصيل عند درجة حرارة الغرفة. يظهر **الشكل 9-19** الارتفاع الهائل في درجات الحرارة الحرجة للموصّلات الفائقة التوصيل منذ اكتشاف هذه الظاهرة.

درجة الحرارة الحرجة (K)
150
140
130
120
110
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
$HgBa_2Ca_2Cu_2O_8$
Ti–Ba–Ca–Cu–O
Bi–Ba–Ca–Cu–O
$YBa_2Cu_3O_7$
La–Sr–Cu–O
La–Ba–Cu–O
Nb_3Ge
NbN
Hg
السائل O_2
السائل N_2
السائل H_2
السائل He
1910 1930 1950 1970 1990
سنة الاكتشاف

الشكل 9-19
شهدت الأعوام الثلاثون الأخيرة ارتفاعًا هائلاً في درجة الحرارة التي تصبح عندها المواد فائقة التوصيل.

الموصّلات الفائقة التوصيل تستطيع تخفيض فقد الطاقة وإحداث ثورة في الإلكترونيات

إن خاصية المقاومة صفر في حالة التيار المستمرّ يمكن أن تكون مفيدة جدًّا في عملية نقل الطاقة الكهربائيّة المنخفضة الفقد. إن جزءًا ملحوظًا من الطاقة الكهربائيّة المنقولة يتحوّل إلى طاقة داخليّة في الموصّلات العاديّة. إذا أمكن صنع خطوط نقل الطاقة الكهربائيّة من موادّ فائقة التوصيل يمكن إلغاء هذه الخسائر ويحدث توفير ملحوظ في كلفة الطاقة.

يمكن أن يكون للموصّلات الفائقة التوصيل عند درجات حرارة مرتفعة تأثير كبير في مجال الإلكترونات. إن وصلة موصّلين فائقي التوصيل، كوصلة شبه موصّلين، لها مثلاً خصائص خاصة. سيعمل الموصّلان الفائقا التوصيل عمل مفتاح إلكتروني. يمكن استعمال الفيلم الفائق التوصيل للتوصيل بين رقاقات الحاسوب مما يزيد من سرعة عمليات الحاسوب.

يمكن استعمال حلقات فائقة التوصيل كأجهزة لتخزين الطاقة الكهربائيّة. بما أن المقاومة الكهربائيّة للموصّل الفائق التوصيل تكون معدومة، فإن التيار المارّ في حلقة فائقة التوصيل يستمرُّ إلى ما لا نهاية. ويمكن استخراج تلك الطاقة الكهربائيّة لاحقًا.

للنواقل الفائقة التوصيل خصائص مغناطيسيّة خاصة

رأينا سابقًا أنه حين يمرُّ تيار كهربائي في موصّل ينشأ مجال مغناطيسي حول ذلك الموصّل. إذا قرّب قضيب مغناطيسي من ذلك الموصّل، فإنهما يتجاذبان أو يتنافران. هذا التفاعل يشكّل الأساس لظاهرة التعويم المغناطيسي، حيث يعوم جسم في الهواء بفعل قوّة التنافر بينه وبين مغناطيس موجود تحته. تكون تلك المغانط عادة مغانط كهربائيّة لكنها تتسبَّب بفقد مقادير كبيرة من الطاقة بسبب مقاومتها للتيار الكهربائي. تتجلّى حلّ هذه المشكلة باستعمال أسلاك فائقة التوصيل في صنع المغانط الكهربائيّة.

للتعويم المغناطيسي تطبيقات كثيرة واعدة في مجال النقل. ففي اليابان صُنع قطار يعمل وفق مبدأ التعويم المغناطيسي.

تستعمل المغانط الفائقة التوصيل أيضًا في مسارعات الجسيمات العالية الطاقة. من التطبيقات المهمَّة الأخرى للمغانط الفائقة التوصيل وسيلة للتشخيص تسمى *التصوير بالرنين المغناطيسي* (MRI). وقد أدّت هذه التقنيّة دورًا بارزًا في التشخيص الطبي، فهي تستعمل أشعة راديو سليمة، بدلاً من الأشعة السينيّة العالية الطاقة، في تصوير أعضاء الجسم. يبيّن **الشكل 9-20** مريضًا يخضع للتصوير بالرنين المغناطيسي إلى جانب صور لدماغه.



الشكل 9-20

التصوير بالرنين المغناطيسي (MRI) هو أحد التطبيقات الطبيّة للمغانط الفائقة التوصيل.

مراجعةُ القسم 9-3

1. لا تنعدم مقاومة إحدى المواد حتى حين تبرّد إلى الصفر المطلق. ماذا تتوقّع أن تكون بنية تلك المادة؟

2. هل تصطدم إلكترونات في موصّل فائق التوصيل بذرّات فيه؟ وضّح إجابتك.

3. ما أوجه التشابه بين الموصّل الفائق التوصيل والمكثّف؟ ما أوجه الاختلاف بينهما؟

4. تستعمل في تصوير الدماغ بالرنين المغناطيسي (MRI) موجات راديو بدلاً من الأشعة السينيّة. احسب طاقة فوتون أشعة سينية ذات طول موجي مقداره $1.0 \times 10^{-10}\text{m}$. بعد ذلك احسب طاقة فوتون موجة راديو ذات تردُّد 100 MHz.

ملخّصُ الفصل 9

أفكارٌ أساسية

القسم 9-1 التوصيل في الأجسام الصلبة

- يمكن تصنيف الأجسام الصلبة، بحسب خصائصها الإلكترونيّة، إلى موصّلات، وعوازل، وأشباه موصّلات.
- تشغل إلكترونات الأجسام الصلبة مجموعات من مستويات الطاقة تسمى حزمًا.
- يمكن استثارة إلكترونات أشباه الموصّلات من حزمة التكافؤ إلى حزمة مختلفة تسمى حزمة التوصيل. عندما يحدث ذلك يوصّل شبه الموصّل شحنة كهربائيّة.

القسم 9-2 تطبيقات أشباه الموصّلات

- يمكن للشحنة أن تتحرّك في مادّة على شكل إلكترونات أو ثقوب ذات شحنة موجبة نتجت عن نقص في الإلكترونات.
- يحتوي شبه الموصّل صنف n على شوائب لذرّات لها خمس إلكترونات تكافؤ بدلاً من أربعة. وبالنتيجة تشكّل الإلكترونات أكثرية حاملات الشحنة.
- يحتوي شبه الموصّل صنف p على شوائب لذرّات لها ثلاثة إلكترونات تكافؤ بدلاً من أربعة. وبالنتيجة تشكّل الثقوب ذات الشحنة الموجبة أكثرية حاملات الشحنة.
- تسمح البلّورة الثنائية بمرور التيار الكهربائي في اتجاه واحد وتمنعه في الاتّجاه الآخر.
- يتكوّن الترانزيستور من بلّورتين ثنائيتين ملتصقتين الظهر إلى الظهر ومنحازتين بالشكل المناسب بوساطة بطاريات. ويمكن استعمال الترانزيستور لتضخيم الإشارات الضعيفة.

القسم 9-3 الموصّلات فائقة التوصيل

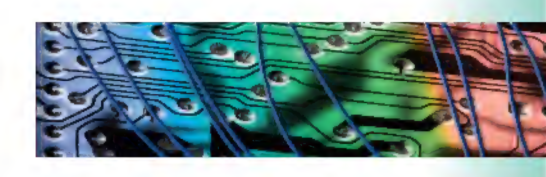
- الموصّل الفائق التوصيل جسم صلب لا تكون له مقاومة عند درجات حرارة أدنى من درجة حرارة تسمّى درجة الحرارة الحرجة.
- وفق نظرية BCS تنتقل الإلكترونات أزواجًا من دون أن يتغيّر الزخم الخطّي للزوجين.

رموزُ المخطّطات

الإلكترون	⊖	سهم التيار الكهربائي	⇨
الثقب	⊕	البلّورة الثنائية	─▶├─
متّجه المجال الكهربائي	⇨	الترانزيستور	(رمز)

مصطلحاتٌ أساسية

- إلكترونات التكافؤ — Valence electrons (ص 251)
- الحالة الأرضيّة — Ground state (ص 251)
- الحالة المستثارة — Excited state (ص 251)
- فجوة الطاقة — Energy gap (ص 252)
- الثقب — Hole (ص 256)
- الإشابة — Doping (ص 257)
- البلورة الثنائية — Diode (ص 258)
- الترانزيستور — Transistor (ص 261)



مراجعةُ الفصل 9

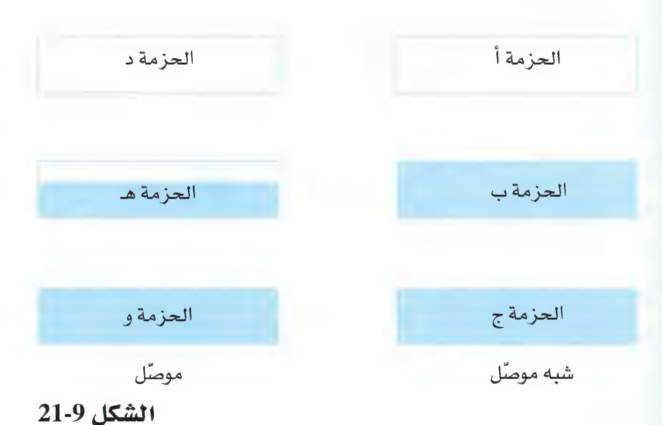
راجعْ وقيِّمْ

إلكترونات التكافؤ ونظرية الحزم

أسئلةُ مراجعة

1. ناقش الفروق بين حزم الفلزّات والعوازل وأشباه الموصّلات. كيف يمكّنك نموذج الحزم من فهم الخصائص الكهربائيّة لهذه المواد؟

2. أيّ من حزم الطاقة في **الشكل 9-21** يحتوي على إلكترونات تكافؤ غير مستثارة؟



الشكل 9-21

3. أيّ ممّا يلي قادر على التحرّك وتوصيل الكهرباء؟

أ. إلكترون موجود في الطبقة الداخليّة الأقرب للنواة في ذرّة إنديوم.

ب. إلكترون موجود في الطبقة الداخليّة الأقرب للنواة في النحاس.

ج. إلكترون تكافؤ في ذرّة نحاس في سلك.

د. إلكترون تكافؤ في السيلينيوم شبه الموصّل.

هـ. إلكترون مستثار في السيلينيوم شبه الموصّل.

و. إلكترون في حزمة التوصيل للجرمانيوم شبه الموصّل.

4. أيٌّ له فجوة حزم أوسع: الأيودين العازل، أم السيليكون شبه الموصّل؟

أسئلةٌ حول المفاهيم

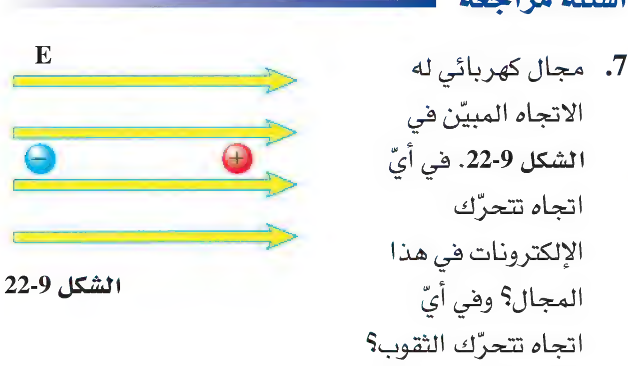
5. حين يمتصُّ شبه موصّل فوتونًا يتكوّن زوج إلكترون–ثقب. استعمل نموذج حزمة الطاقة لتوضّح كيف يسمح ذلك لشبه الموصّل بتوصيل الكهرباء.

6. تتراوح طاقة الضوء المرئي بين 1.8 eV و 3.2 eV، استعمل هذه الحقيقة لتوضّح لماذا يظهر السيليكون معتمًا ويظهر الماس شفّافًا، مع العلم أن فجوة طاقة السيليكون هي 1.1 eV وفجوة طاقة الماس 5.5 eV، وأن ذرّاتهما وبنيتيهما متشابهة.

الموصّلات والبلّورات الثنائيّة والترانزيستورات

أسئلةُ مراجعة

7. مجال كهربائي له الاتجاه المبيّن في **الشكل 9-22**. في أيّ اتجاه تتحرّك الإلكترونات في هذا المجال؟ وفي أيّ اتجاه تتحرّك الثقوب؟



الشكل 9-22

8. أيٌّ من أشباه الموصّلات التالية يحتوي على عدد أكبر من الثقوب: شبه الموصّل المشوب بذرّات ذات ثلاثة إلكترونات تكافؤ، أم أربعة إلكترونات تكافؤ، أم خمسة إلكترونات تكافؤ؟

9. ما نوع حاملات الشحنة التي تشكّل الأكثرية في شبه موصّل صنف n؟

10. ما نوع حاملات الشحنة التي تشكّل الأكثرية في شبه موصّل صنف p؟

11. أوضح الفرق بين البلورات الثنائيّة والمقاومات.

12. حين تستعمل بلّورة ثنائية واحدة كمقوِّم، هل تعطي تيّارًا ذا شدّة كهربائيّة ثابتة؟

13. البلورة الثنائية p-n في **الشكل 9-23** موصّلة للكهرباء.

أ. كيف تتحرّك الإلكترونات في الدائرة الكهربائيّة؟

ب. كيف تتحرّك الثقوب في الدائرة الكهربائيّة؟



دائرة كهربائيّة فيها بلورة ثنائية موصّلة

الشكل 9-23

14. إذا عكست التوصيلات الكهربائيّة بقطبَي البطارية في **الشكل 9-23**، فهل تبقى البلّورة الثنائية موصّلة للكهرباء؟

15. وضّح كيف تختلف الترانزيستورات عن البلورات الثنائيّة.

16. إلى أيّ نقطتين من الترانزيستور p-n-p الموصوف في الصفحة 267 وُصِّلت الإشارة الدخل؟

17. إلى أيّ نقطتين من الترانزيستور p-n-p الموصوف في الصفحة 267 وُصِّلت الإشارة الخرج؟

أسئلةٌ حول المفاهيم

18. تكون الذرّات التي تمتلك خمسة إلكترونات تكافؤ، كالزرنيخ مثلاً، ذرّات مانحة في شبه الموصّل، وتكون الذرّات التي تمتلك ثلاثة إلكترونات تكافؤ، كالكاليوم مثلاً، ذرّات متقبِّلة. راجع الجدول الدوري لتحدِّد عناصر أخرى يمكن أن تكون مانحة أو متقبِّلة جيدّة.

19. هل يفضّل أن تكون قيمة كسب التيّار لترانزيستور مضخّم مساوية للواحد أم أكبر أم أصغر؟

الموصّلات الفائقة التوصيل

أسئلةُ مراجعة

20. إذا كانت مادّة فائقة التوصيل، هل يرجّح أن تحتوي شبكتها البلوريّة على شوائب؟

21. ما الذي يبقى محفوظًا حين تتحرّك أزواج كوبر عبر موصّل فائق التوصيل؟

22. هل يوجد تجاذب مباشر بين إلكترونات أزواج كوبر؟

أسئلةٌ حول المفاهيم

23. هل يمكن لمادَّة فائقة التوصيل أن تُستعمل كأداة للتسخين في فرن أو جهاز تحميص؟ علِّل ذلك.

24. هل يمكن لمادَّة فائقة التوصيل أن تُستعمل لنقل جهد التوتّر العالي؟ علِّل ذلك.

مراجعةٌ عامَّة

25. مقدار فجوة طاقة السيليكون عند درجة الحرارة 300 K هو 1.14 eV.

أ. ما قيمة الحدّ الأدنى لتردُّد فوتون ينقل إلكترونًا من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل في السيليكون؟

ب. ما الطول الموجي لهذا الفوتون؟

26. بلورة ثنائية مُصدرة للضوء LED مكوّنة من شبه الموصّل GaAsP تصدر ضوءًا أحمر طوله الموجي 650 nm. حدِّد قيمة فجوة الطاقة في شبه الموصّل.

27. معظم الأطوال الموجية للإشعاعات الشمسية تكون ذات رتبة عظم 10^{-6}m أو أقل. كم يجب أن تكون فجوة الطاقة لمادة معيَّنة في خلية ضوئية، بحيث تمتص الإشعاعات الشمسية؟

المشاريعُ والتقاريرُ

1. تمتلك ذرّات السيليكون Si أربعة إلكترونات تكافؤ. وتمتلك ذرّات الزرنيخ As المستعملة كشوائب خمسة إلكترونات تكافؤ. هل يكون لشبه الموصّل صنف n الناتج شحنة سالبة؟ ارسم مخطَّطًا يدعم رأيك أو يدحضه. اعرض حججك أمام الصف.

2. صمّم تجربة لتقصّي تأثيرات تغيير درجة الحرارة، على مدى $100^{o}C$، في مقاومة موصّل فلزي. راجع قانون أوم قبل أن تخطِّط تجربتك. عدِّد الموادّ التي تلزمك، وصِفِ الخطوات التي ستتبعها، ومنها القياسات التي ستأخذها. بعد أن يوافق المعلّم على مخطَّطك، أحضر المواد اللازمة ونفِّذ التجربة. ماذا تتوقَّع من نتائجك أن تكون المقاومة عند الصفر المطلق؟

3. ابحث عن معلومات حول الخصائص الفيزيائية ومصادر استعمالات أخرى للعناصر التي يمكن استعمالها في الموصّلات الفائقة التوصيل. أحضر صورًا لعيّنات منها إذا أمكن. نظِّم ما تجده في ملصقات أو كتيّبات أو عرض على الحاسوب.

4. أجرِ مقابلة مع شخص يعمل في صناعة الإلكترونيات أو اسأل عن المهن في هذا المصنع. تعرّف إلى أنواع الأعمال المتوافرة، وإلى التعليم والتدريب اللازمين لهذه الأعمال. حضِّر ملفًّا يوثّق عملية البحث التي قمت بها والرسائل التي كتبتها والملاحظات التي دوّنتها خلال مقابلاتك، ومصادر المعلومات الأخرى. حضِّر تقريرًا ملخصًا أو كتيّبًا أو عرضًا، بالاستناد إلى بحثك، يمكن استعماله كدليل في مركز للتوجيه المهني.



تقويم الفصل 9

اختيارٌ من متعدِّد

1. تُسمّى أعلى حزمة للطاقة يمكن أن يوجد فيها إلكترونات:

أ. حزمة التوصيل.

ب. حزمة الفجوة.

ج. حزمة التكافؤ.

د. حزمة الطاقة.

2. إن ما يميز العوازل من أشباه الموصّلات هو:

أ. عدد الإلكترونات في حزمة التكافؤ.

ب. درجة حرارة المادة.

ج. مقدار فجوة الطاقة.

د. اعتماد نظرية بور لحركة الإلكترونات.

3. في حالة الموصّلات:

أ. يجب أن تكون فجوة الطاقة كبيرة جدًّا.

ب. لا يتم التوصيل الكهربائي إلا عند درجات حرارة مرتفعة.

ج. تكون حزمة التكافؤ خالية من الإلكترونات.

د. تكون حزمة التكافؤ مملوءة بالإلكترونات جزئيًّا.

4. يتميز شبه الموصّل الأصيل من شبه الموصّل المشوب بـ:

أ. عدم وجود مستويات طاقة في فجوة الطاقة.

ب. توصيله الأفضل للتيار الكهربائي.

ج. عدم تأثّره بدرجة الحرارة.

د. عدم وجود حزمة تكافؤ.

5. في شبه الموصّل من الصنف n، تكون مستويات الطاقة:

أ. المانحة أقرب إلى حزمة التكافؤ.

ب. المانحة أقرب إلى حزمة التوصيل.

ج. المتقبّلة أقرب إلى حزمة التوصيل.

د. المتقبّلة أقرب إلى حزمة التكافؤ.

6. البلورة الثنائية p-n توصّل التيار الكهربائي:

أ. في الاتجاهين بالمقدار نفسه.

ب. في حالة الانحياز العكسي.

ج. في حالة الانحياز الأمامي.

د. في حالة تطبيق فرق جهد مرتفع فقط.

7. تكون علاقة التيار بدلالة فرق الجهد حول طرفي بلورة ثنائية p-n.

أ. علاقة خطّية.

ب. علاقة طردية.

ج. علاقة غير خطّية.

د. علاقة عكسية.

8. يتميَّز الترانزيستور p-n-p من الترانزيستور n-p-n:

أ. بكون المادّة الأساسية سيليكون أو جرمانيوم.

ب. بأن الترانزيستور p-n-p لا يضخّم الإشارة.

ج. بكون p-n-p له وصلتان في حين أن n-p-n له ثلاث وصلات.

د. بطريقة ترتيب أصناف أشباه الموصّلات.

أسئلةٌ ذاتُ إجابةٍ قصيرةٍ

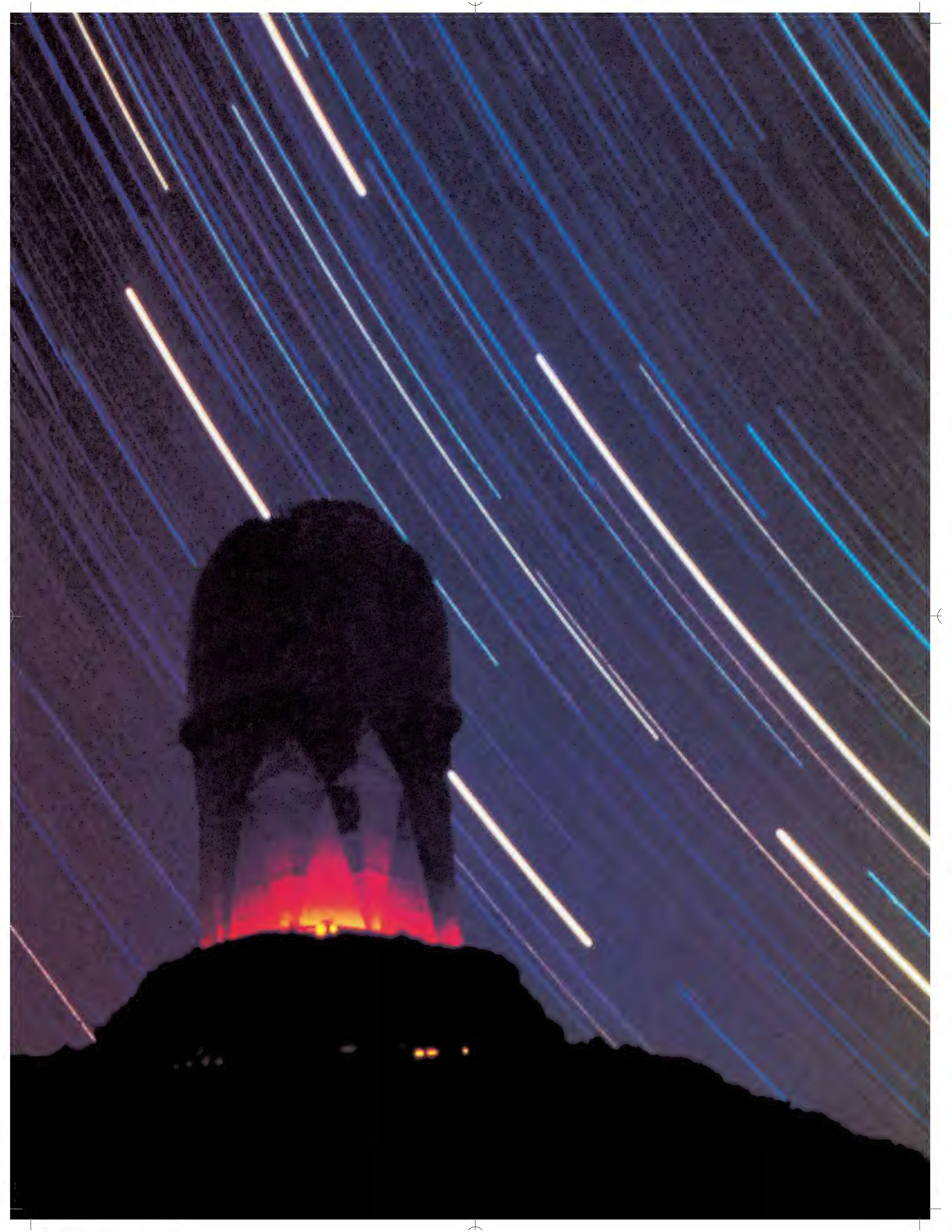
9. ما أهم تطبيقات البلورة الثنائية p-n؟

10. كيف تكون العلاقة بين تيار الخرج وتيار القاعدة في الترانزيستور؟

أسئلةٌ ذاتُ إجابةٍ مطوَّلة

11. اشرح الفرق بين الموصّلات والموصّلات فائقة التوصيل وكيفية الانتقال من النوع الأول إلى النوع الثاني.

12. اذكر أهم إيجابيات الدوائر الكهربائية المتكاملة وبعض تطبيقاتها.



قسمُ الملاحق

الملحق (أ): مراجعةٌ في الرياضيات

الترميزُ العلميّ

قوى العشَرةِ الموجبةِ

الكثيرُ من الكمياتِ التي يتعاملُ بها العلماءُ تكونُ، في الغالب، كبيرةً جدًّا أو صغيرةً جدًّا. فللضوءِ مثلاً سرعةٌ مقدارُها حوالي 300 000 000 m/s، والحبرُ اللازمُ لوضعِ نقطةٍ على حرفٍ تبلغُ كتلتُه 0.000 000 001 kg. يربكُنا التعاملُ مع أرقامٍ كهذه. ولتفادي هذا الإرباكِ نستخدمُ طريقةً تعتمدُ على قوى الرقم 10.

$$10^0 = 1$$
$$10^1 = 10$$
$$10^2 = 10 \times 10 = 100$$
$$10^3 = 10 \times 10 \times 10 = 1000$$
$$10^4 = 10 \times 10 \times 10 \times 10 = 10\ 000$$
$$10^5 = 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 = 100\ 000$$

قوةُ الرقمِ عشَرَة، أو أُسُّ الرقمِ عشرة، تحدِّدُ عددَ الأصفار، فنكتبُ سرعةَ الضوءِ التي تبلغُ 300 000 000 m/s على شكلِ 3×10^8 m/s. ويكونُ في هذه الحالةِ أسُّ العشرةِ الرقم 8.

قوى العشَرةِ السالبة

للأرقامِ التي تقِلُّ عن 1، نلاحظُ ما يلي:

$$10^{-1} = \frac{1}{10} = 0.1$$

$$10^{-2} = \frac{1}{10 \times 10} = 0.01$$

$$10^{-3} = \frac{1}{10 \times 10 \times 10} = 0.001$$

$$10^{-4} = \frac{1}{10 \times 10 \times 10 \times 10} = 0.0001$$

$$10^{-5} = \frac{1}{10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10} = 0.000\ 01$$

تساوي قيمةُ القوةِ السالبةِ عددَ الخاناتِ التي يجبُ أن تقطعَها الفاصلةُ يمينًا لتصبحَ إلى يمينِ خانةِ الرقمِ الأولِ غيرِ الصفر (الخانةُ في هذه الحالةِ هي 1). والطريقةُ التي تُكتبُ بها الأعدادُ هي - من 1 إلى أقلَّ من عشرة - على شكلِ رقمٍ مضروبٍ بقوةِ العشرةِ الموجبةِ أو السالبة، تُسمَّى الترميزَ العلميّ. نكتبُ مثلاً العدد 000 000 943 5 على الشكلِ 5.943×10^9. وبطريقةِ الترميزِ العلميِّ، كذلك نكتبُ 2 083 0.000 على الشكلِ 8.32×10^{-5}.

الضربُ والقسمةُ باستخدامِ الترميزِ العلميّ

عند ضربِ الأرقامِ المكتوبةِ بطريقةِ الترميزِ العلميِّ يمكنُ استخدامُ القاعدةِ التالية:

$$10^n \times 10^m = 10^{(m+n)}$$

يمكنُ لـ n و m أن يكونَ كلٌّ منهما أيَّ عدد، وليس بالضرورةِ عددًا صحيحًا. مثلاً، $10^2 \times 10^5 = 10^7$ في حين أن $10^{1/4} \times 10^{1/2} = 10^{3/4}$. تُطبَّقُ هذه القاعدةُ أيضًا على القوى السالبة، فمثلاً: $10^3 \times 10^{-8} = 10^{-5}$. عند قسمةِ الأعدادِ المكتوبةِ بالترميزِ العلميِّ، نلاحظُ ما يلي:

$$\frac{10^n}{10^m} = 10^n \times 10^{-m} = 10^{(n-m)}$$

فمثلاً، $\frac{10^3}{10^2} = 10^{(3-2)} = 10^1$

الكسور

يلخِّصُ **الجدولُ 1**(أ) قواعدَ عملياتِ ضربِ الكسورِ وقسمتِها وجمعِها وطرحِها، حيث a وb وc وd هي أربعةُ أرقام.

الجدول 1(أ) العملياتُ الأساسيةُ للكسور

العملية	القاعدة	المثال
الضرب	$\left(\frac{a}{b}\right)\left(\frac{c}{d}\right) = \frac{ac}{bd}$	$\left(\frac{2}{3}\right)\left(\frac{4}{5}\right) = \frac{(2)(4)}{(3)(5)} = \frac{8}{15}$
القسمة	$\frac{\left(\frac{a}{b}\right)}{\left(\frac{c}{d}\right)} = \frac{ad}{bc}$	$\frac{\left(\frac{2}{3}\right)}{\left(\frac{4}{5}\right)} = \frac{(2)(5)}{(3)(4)} = \frac{5}{6}$
الجمعُ والطرح	$\frac{a}{b} \pm \frac{c}{d} = \frac{ad \pm bc}{bd}$	$\frac{2}{3} - \frac{4}{5} = \frac{(2)(5) - (3)(4)}{(3)(5)} = -\frac{2}{15}$

القوى

قواعدُ الأُس

عند ضربِ كميةٍ معينةٍ (x) قوتُها (m) في الكمّيةِ نفسِها وقوتُها (n)، نطبّقُ قاعدةَ الترميزِ العلميِّ كما يلي:

$$(x^n)(x^m) = x^{(n+m)}$$

مثلاً، $(x^2)(x^4) = x^{(2+4)} = x^6$

عند قسمةِ قوًى مختلفةٍ للكمّيةِ نفسِها نلاحظ:

$$\frac{x^n}{x^m} = x^{(n-m)}$$

مثلاً، $\frac{x^8}{x^2} = x^{(8-2)} = x^6$

القوةُ التي على شكلِ كسرٍ مثل $\frac{1}{3}$ ، تصبحُ جذرًا كما يلي:

$$x^{1/n} = \sqrt[n]{x}$$

مثلاً، $4^{1/3} = \sqrt[3]{4} = 1.5874$ (يمكنُ الاستفادةُ من الآلةِ الحاسبةِ لهذه الحسابات.)
أخيرًا، عند رفع كميةِ x^n إلى القوةِ m تصبحُ كما يلي:

$$(x^n)^m = x^{nm}$$

مثلاً، $(x^2)^3 = x^{(2)(3)} = x^6$
يلخصُ **الجدولُ 2** (أ) القواعدَ الأساسيةَ للأُسّ.

الجدول 2(أ) القواعدُ الأساسيةُ للأُسّ

$(x^n)(x^m) = x^{(n+m)}$	$x^1 = x$	$x^0 = 1$
$(x^n)^m = x^{(nm)}$	$x^{1/n} = \sqrt[n]{x}$	$\frac{x^n}{x^m} = x^{(n-m)}$

الجبر

حسابُ المجهول

عند قيامِنا بعملياتٍ جبرية، نطبّقُ قوانينَ الحساب. تمثّلُ الرموز، مثلُ x، y، z، عادةً كمياتٍ غيرَ محدَّدة «المجهولات».
لنأخذْ أولاً المعادلة:

$$8x = 32$$

إذا أردنا حسابَ x، نقسِمُ طرفَيِ المعادلةِ على المعاملِ نفسِهِ دون تغييرٍ في المعادلة. في هذه الحالةِ إذا قسمنا الطرفينِ على 8 نحصلُ على:

$$\frac{8x}{8} = \frac{32}{8}$$

$$x = 4$$

لنأخذْ بعدها المعادلةَ التالية:

$$x + 2 = 8$$

في هذا النوعِ من المعادلاتِ، نجمعُ أو نطرحُ كميةً واحدةً من كلِّ طرف. إذا طرحنا 2 من كلِّ طرفٍ نحصلُ على التالي:

$$x + 2 - 2 = 8 - 2$$

$$x = 6$$

وبشكلٍ عامٍّ $x + a = b$ تُحوَّلُ إلى $x = b - a$

لنأخذ الآنَ المعادلةَ التالية:

$$\frac{x}{5} = 9$$

إذا ضربنا كلَّ طرفٍ في 5، تبقى x وحدَها في الطرفِ الأيسر والقيمةُ 45 في الطرفِ الأيمن.

$$(5)\left(\frac{x}{5}\right) = (9)(5)$$

$$x = 45$$

في جميعِ الحالات، ما يطبَّقُ من عملياتٍ على الطرفِ الأيسر يجبُ أن يطبَّقَ على الطرفِ الأيمن.

التحليلُ إلى عوامل

يبيِّنُ **الجدول 3** (أ) بعضَ المعادلاتِ المفيدةِ لتحليلِ المعادلةِ إلى عوامل.

يمكنُ مثلاً كتابةُ المعادلةِ $5x + 5y + 5z = 0$ على الشكل $5(x + y + z) = 0$، حيثُ يسمَّى الرقم 5 عاملاً مشترَكًا.

أما التعبيرُ $a^2 + 2ab + b^2$، الذي يعتبرُ مثالاً على مربعٍ كامل، فيمكنُ أن يُكتب: $(a + b)^2$.

إذا كانت $a = 2$ و $b = 3$، عندها تصبحُ المعادلةُ: $2^2 + (2)(2)(3) + 3^2 = (2 + 3)^2$،

أو $(4 + 12 + 9) = 25$، وأخيرًا $5^2 = 25$.

وكمثالٍ على الفرقِ بين عددين مربعين نأخذُ $a = 6$ و $b = 3$.

في هذه الحالة $(6^2 - 3^2) = (6 + 3)(6 - 3)$ أو $(36 - 9) = (9)(3) = 27$.

الجدول 3 (أ) معادلاتُ التحليلِ إلى عوامل

عاملٌ مشترك	$ax + ay + az = a(x + y + z)$
مربعٌ كامل	$(a + b)^2 = a^2 + 2ab + b^2$
الفرقُ بين عددين مربعين	$a^2 - b^2 = (a + b)(a - b)$

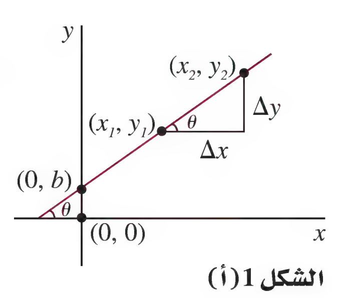
المعادلاتُ الخطّية

للمعادلةِ الخطّيةِ الشكلُ العامُّ التالي:

$$y = ax + b$$

حيث a وb ثابتان. تُسمَّى هذه المعادلةُ معادلةً خطِّيَّةً، لأن منحنى y بالنسبة إلى x هو خطٌّ مستقيمٌ، كما يظهرُ في **الشكل 1** (أ). يسمَّى الثابتُ b التقاطعَ مع المحورِ y. يساوي الثابتُ a ميلَ الخطِّ المستقيم، ويساوي أيضًا ظلَّ الزاويةِ بين هذا الخطِّ والمحورِ x، أيّ θ. إذا حدَّدنا على الخطِّ، إحداثياتِ النقطتين (x_1, y_1) و(x_2, y_2)، كما في **الشكل 1** (أ)، يكونُ ميلُ الخطِّ المستقيم:

$$\text{الميل} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

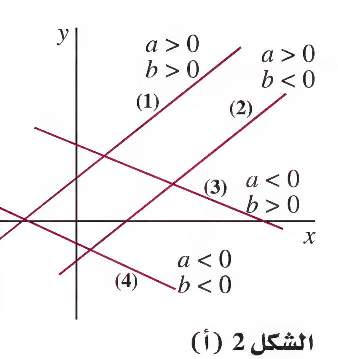


الشكل 1 (أ)

لنأخذْ مثلاً النقطتين (2،4) و (6،9)، مع هذه القيمِ يكونُ ميلُ الخط:

$$\text{الميل} = \frac{(9-4)}{(6-2)} = \frac{5}{4}$$

لاحظْ أن من الممكن لكلٍّ من a و b أن تكونَ موجبةً أو سالبةً. يكونُ ميلُ الخطِّ المستقيمِ موجبًا إذا كانت $a > 0$، وسالبًا إذا كانت $a < 0$. بالإضافةِ إلى ذلك يكونُ التقاطعُ مع محورِ y موجبًا إذا كانت $b > 0$، وسالبًا إذا كانت $b < 0$. يبيِّنُ **الشكل 2** (أ) أمثلةً على الحالاتِ الأربعِ السابقةِ، التي لخَّصَها **الجدول 4** (أ).



الشكل 2 (أ)

الجدول 4 (أ) المعادلاتُ الخطّية

الثوابت	الميل	التقاطعُ مع y
$a > 0, b > 0$	موجب	موجب
$a > 0, b < 0$	موجب	سالب
$a < 0, b > 0$	سالب	موجب
$a < 0, b < 0$	سالب	سالب

التحويلُ بين الكسورِ والأعدادِ العُشريةِ والنسبِ المئويةِ

يلخِّص **الجدولُ 5** (أ) قواعدَ تحويلِ الأعدادِ من كسورٍ إلى أعدادٍ عُشريةٍ ونسبٍ مئوية، ومن نسبٍ مئويةٍ إلى أعدادٍ عُشرية.

الجدول 5 (أ) التحويلات

التحويل	القاعدة	المثل
من كسرٍ إلى عددٍ عُشريّ	اقسِمِ الصورةَ على المخرج	$\frac{31}{45} = 0.69$
من كسرٍ إلى نسبةٍ مئوية	حوِّل إلى عددٍ عُشريٍّ ثم اضرب في 100%	$\frac{31}{45} = (0.69)(100\%) = 69\%$
من نسبةٍ مئويةٍ إلى عددٍ عُشريّ	حرِّكِ الفاصلةَ خانتينِ إلى اليسار، وتخلَّصْ من إشارةِ النسبةِ المئوية	$69\% = 0.69$

الجدول 6 (أ) يعطي معادلاتِ المساحةِ والحجمِ لأشكالٍ هندسيةٍ متنوّعةٍ تردُ في هذا الكتاب.

الجدول 6 (أ) المساحاتُ والحجومُ الهندسية

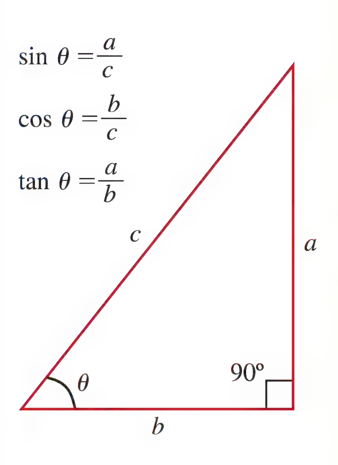
أشكالٌ هندسية		معادلات
المستطيل	l، w	المساحة = lw المحيط = $2(l+w)$
الدائرة	r	المساحة = πr^2 المحيط = $2\pi r$
المثلث	h، b	المساحة = $\frac{1}{2}bh$
الكرة	r	مساحةُ السطح = $4\pi r^2$ الحجم = $\frac{4}{3}\pi r^3$
الأسطوانة	l، r	الحجم = $\pi r^2 l$ المساحةُ الجانبية = $2\pi rl$
الصندوقُ المستطيل	w، l، h	مساحةُ السطح = $2(lh + lw + hw)$ الحجم = lwh

علمُ المثلثاتِ ونظريةُ فيثاغورس

علمُ المثلثاتِ هو فرعُ الرياضياتِ الذي يتعلّقُ بخصائص المثلثِ القائمِ الزاوية. وتعتبرُ معظمُ مفاهيمِ هذا الفرعِ ذاتَ أهميةٍ قصوى في دراسةِ الفيزياء. لمراجعةِ بعضِ المفاهيمِ الأساسيةِ في علمِ المثلثات، نأخذُ مثلثًا قائمَ الزاوية، كالذي في **الشكل 3** (أ)، حيثُ الضلعُ a مقابلٌ للزاويةِ θ، والضلعُ b مجاورٌ لها، والضلعُ c وترُ المثلث. يلخصُ **الجدولُ 7** (أ)، بالاستنادِ إلى **الشكل 3** (أ)، معظمَ الدوالِّ المثلثيةِ الأساسية.

الجدولُ 7 (أ) الدوالُّ المثلثية

الجيب (sin)	$\sin\theta = \frac{a}{c} = \frac{\text{الضلع المقابل لـ } \theta}{\text{الوتر}}$
جيبُ التمام (cos)	$\cos\theta = \frac{b}{c} = \frac{\text{الضلع المجاور لـ } \theta}{\text{الوتر}}$
الظل (tan)	$\tan\theta = \frac{a}{b} = \frac{\text{الضلع المقابل لـ } \theta}{\text{الضلع المجاور}}$
الجيبُ العكسيّ ($\sin^{-1}$)	$\sin^{-1}\left(\frac{a}{c}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{\text{الضلع المقابل لـ } \theta}{\text{الوتر}}\right) = \theta$
جيبُ التمامِ العكسيّ ($\cos^{-1}$)	$\cos^{-1}\left(\frac{b}{c}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{\text{الضلع المجاور لـ } \theta}{\text{الوتر}}\right) = \theta$
الظلُّ العكسيّ ($\tan^{-1}$)	$\tan^{-1}\left(\frac{a}{b}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{\text{الضلع المقابل لـ } \theta}{\text{الضلع المجاور لـ } \theta}\right) = \theta$



الشكل 3 (أ)

فمثلاً، إذا كان قياسُ الزاويةِ $\theta = 30°$، تكونُ نسبةُ a إلى c دائمًا 0.50، ومعنى ذلك أن $\sin 30° = 0.50$. وليس لدوالِّ الجيبِ وجيبِ التمامِ والظلِّ أيُّ وحداتِ قياس، لأنها تمثلُ نسبةَ طولين. لاحظْ أيضًا العلاقةَ التالية:

$$\frac{\sin\theta}{\cos\theta} = \frac{\frac{\text{الضلع المقابل لـ } \theta}{\text{الوتر}}}{\frac{\text{الضلع المجاور لـ } \theta}{\text{الوتر}}} = \frac{\text{الضلع المقابل لـ } \theta}{\text{الضلع المجاور لـ } \theta} = \tan\theta$$

بعضُ العلاقاتِ المثلثيةِ الإضافيةِ هي التالية:

$$\sin^2\theta + \cos^2\theta = 1$$

$$\sin\theta = \cos(90° - \theta)$$

$$\cos\theta = \sin(90° - \theta)$$

حسابُ ضلعٍ مجهول

يمكنُ استعمالُ الدوالِّ الثلاثِ الأولى الواردةِ في **الجدول 7** (أ) لحسابِ ضلعٍ مجهولٍ في مثلثٍ قائمِ الزواية لدى معرفتِنا طولَ أحد الأضلاع و قياس إحدى الزاويتين (غير القائمة). فمثلاً إذا كانت $\theta = 30°$ و $a = 1.0 \text{ m}$، نحسُبُ الضلعينِ الآخرينِ للمثلثِ على الشكلِ التالي:

$$\sin\theta = \frac{a}{c}$$

$$c = \frac{a}{\sin\theta} = \frac{1.0 \text{ m}}{\sin 30°}$$

$$\boxed{c = 2.0 \text{ m}}$$

$$\tan\theta = \frac{a}{b}$$

$$b = \frac{a}{\tan\theta} = \frac{1.0\text{m}}{\tan 30°}$$

$$\boxed{b = 1.7 \text{ m}}$$

حسابُ زاويةٍ مجهولة

قد يتوفرُ لنا في بعضِ الحالاتِ معرفةُ الجيبِ أو جيبِ التمامِ أو ظلِّ زاوية، ونحتاجُ أن نحدِّدَ قيمةَ الزاويةِ نفسِها هنا. يمكنُ، لهذا الغرض، استخدامُ دوالِّ الجيبِ العكسيِّ، وجيبِ التمامِ العكسيِّ، والظلِّ العكسيِّ، الواردةِ في **الجدول 7** (أ).
فمثلاً إذا كان $a = 1.0 \text{ m}$ و $c = 2.0 \text{ m}$ نحسُبُ الزاوية θ باستعمالِ دالَّةِ الجيبِ العكسيِّ $\sin^{-1}$ كما يلي:

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{a}{c}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{1.0 \text{ m}}{2.0 \text{ m}}\right) = \sin^{-1}(0.50)$$

$$\boxed{\theta = 30°}$$

نظريةُ فيثاغورس

هي نظريةٌ مفيدةٌ في مثلثٍ قائمِ الزاوية. إذا كان a و b ضلعَيّ مثلثٍ قائمِ الزاوية و c وترَه كما في **الشكل 4** (أ)، تُكتبُ نظريةُ فيثاغورس على الشكلِ التالي:

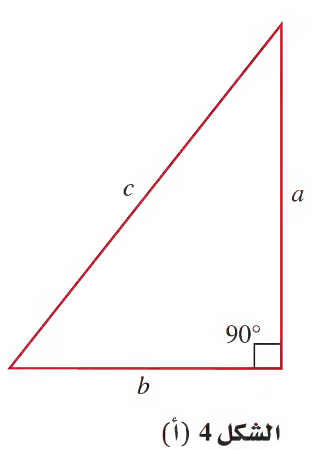
$$c^2 = a^2 + b^2$$

هذا يعني أن مربعَ الوترِ يساوي حاصلَ جمعِ مربعَي الضلعينِ الباقيين. تُستعملُ نظريةُ فيثاغورس لحسابِ ضلعٍ من أضلاعِ المثلث عند معرفةِ الضلعينِ الباقيين. مثلاً إذا كان: $c = 2.0 \text{ m}$ و $a = 1.0 \text{ m}$، يمكنُك حسابُ b باستعمالِ نظريةِ فيثاغورس:

$$b = \sqrt{c^2 - a^2} = \sqrt{(2.0 \text{ m})^2 - (1.0 \text{ m})^2}$$

$$b = \sqrt{4.0 \text{ m}^2 - 1.0 \text{ m}^2} = \sqrt{3.0 \text{ m}^2}$$

$$\boxed{b = 1.7 \text{ m}}$$



الشكل 4 (أ)

الدقةُ في الحساباتِ المختبرية

الخطأُ المطلَقُ

بعضُ التجاربِ الواردةِ في هذا الكتاب، تتضمَّنُ طريقةً لحسابِ قيمةٍ معروفةٍ مسبقًا، كتعجيلِ السقوطِ الحرّ. في هذا النوعِ من التجاربِ تتحدّدُ دقةُ قياساتِك من خلالِ المقارنةِ بين نتائجِكَ والقيمةِ المقبولة. ويعرَّفُ الخطأُ المطلقُ بالقيمةِ المطلقةِ للفرقِ بين النتيجةِ المختبريةِ والنتيجةِ المقبولة.

$$\text{الخطأُ المطلقُ} = \left|\text{القيمةَ المختبريَّةَ} - \text{القيمةِ المقبولةِ}\right|$$

تأكّدْ من عدمِ الخلطِ بين مفهومَيِ الدقةِ والضبط. تَعرَّف إلى دقّةِ القياسِ بمدى قربِ القياسِ من القيمةِ المقبولةِ للكميةِ المقيسة. أما الضبطُ فيعتمدُ على أدواتِ القياس. يكونُ للمسطرةِ المتريةِ المدرَّجةِ بالمليمترات، مثلاً، ضبطٌ أكثرُ من مسطرةٍ متريةٍ مدرَّجةٍ بالسنتيمترات.
إذن فالقيمةُ $9.61\ m/s^2$ المقيسةُ لتعجيلِ السقوطِ الحرِّ هي أكثرُ ضبطًا من القيمةِ $9.8\ m/s^2$، علمًا أن القيمة $9.8\ m/s^2$ هي أكثرُ دقةً من $9.61\ m/s^2$.

الخطأُ النسبيّ

لاحظْ أن القياسَ الذي له، نسبيًّا، خطأٌ مطلقٌ كبيرٌ قد يكونُ أدقَّ من قياسٍ آخرَ خطؤُهُ المطلقُ أقلّ، إذا تضمنَ القياسُ الأولُ كمّياتٍ كبيرةً جدًّا. لهذا السببِ يكونُ للخطأِ النسبيِّ أو الخطأِ المئويِّ أهمّيةٌ أكبرُ من الخطأِ المطلق. ويعرَّفُ الخطأُ النسبيُّ كما يلي:

$$\text{الخطأُ النسبيُّ} = \frac{\left|\text{القيمةَ المختبريَّةَ} - \text{القيمةِ المقبولةِ}\right|}{\text{القيمةِ المقبولةِ}}$$

ولأن الخطأَ النسبيَّ يراعي مقدارَ الكمّيةِ المقيسة، يمكنُ مقارنةُ دقّةِ قياسينِ مختلفينِ من خلالِ المقارنةِ بين خطئِهما النسبيّ.

الملحق (ب): الرموز

الرموزُ الرياضية

الرمز	الدلالة	الرمز	الدلالة
Δ	(دلتا باليونانية) تغيُّرُ كميةٍ ما	$\leq$	أصغرُ من أو يساوي (تقرأُ من اليسارِ إلى اليمين)
Σ	(سيكما باليونانية) جمعُ كميّات	$\propto$	تناسبيّ
θ	(ثيتا باليونانية) زاويةٌ ما	$\approx$	تقريبًا يساوي
$=$	يساوي	$\lvert n \rvert$	مقدارُ القيمةِ المطلقة
$>$	أكبر من (تقرأُ من اليسارِ إلى اليمين)	sin	جيب
$\geq$	أكبرُ من أو يساوي (تقرأُ من اليسارِ إلى اليمين)	cos	جيبُ التمام
$<$	أصغرُ من (تقرأُ من اليسارِ إلى اليمين)	tan	ظلّ

رموزُ الكمّياتِ المستعملة

يُرمزُ إلى الكميةِ المتجهةِ ذاتِ المقدارِ والاتجاهِ بحرفٍ يعلوهُ سهم، أما الحروفُ المائلة *italic* فترمزُ إلى كمياتٍ قياسيةٍ ذاتِ مقدارٍ فقط.

الرمز	الدلالة	الرمز	الدلالة
A	مساحة	M	كتلةٌ كلية
D	قُطرُ الدائرة	R	نصفُ القطر
$\vec{F}$	قوة	t	زمن
F	مقدارُ القوة	V	حجم
m	كتلة		

رموزُ الميكانيكا الدورانيةِ المستعملةُ في هذا الكتاب

الرموزُ التي يعلوها سهمٌ تمثلُ الكمّياتِ الاتجاهيةَ ذاتَ المقدارِ والاتجاه. أما الرموزُ المائلةُ فتمثلُ الكمّياتِ ذاتَ المقدارِ فقط، أو مقدارَ كمّياتٍ اتجاهية. باقي الرموزِ تمثِّلُ، عادةً، الوحدات.

الرمز	الكمية	
a_t	التعجيلُ المماسي	tangential acceleration
a_c	التعجيلُ المركزي	centripetal acceleration
α	(حرفُ ألفا اليوناني) التعجيلُ الزاويّ	(Greek alpha) angular acceleration
$d\ (\sin\theta)$	طولُ ذراعِ العزم	length of lever arm
$\vec{F}_c,\ F_c$	القوةُ التي تحقّقُ الحركةَ الدائرية	force that maintains circular motion
ℓ	طولُ قضيبٍ دورانيّ	length of a rotating rod
s	طولُ قوس	arc length
τ	(حرفُ تاو اليوناني) العزم	(Greek tau) torque
$\tau_{\text{المحصلة}}$	محصّلةُ العزوم	net torque
θ	(حرفُ ثيتا اليوناني) زاويةُ الدوران	(Greek theta) angle of rotation
$\Delta\theta$	(حرفا دلتا وثيتا اليونانيين) الإزاحةُ الزاويّةُ بالرادين	(Greek delta and theta) angular displacment (in radians)
v_t	السرعة المماسية	tangential speed
ω	(حرفُ أوميكا اليوناني) السرعةُ الزاويّة	(Greek omega) angular speed

رموزُ الاهتزازاتِ والموجاتِ والبصرياتِ المستعملةُ في هذا الكتاب

الرمز	الكمية	
d	البُعدُ بين الشقّين في تجربة الشقّ المزدوج لتداخل الضوء	slit separation in double-slit interference of light
$d \sin\theta$	فرقُ المسارِ بين موجتَين ضوئيَّتين متداخلتَين	path difference for interfering light waves
$\vec{F}_{المرنة}$, $F_{المرنة}$	قوةُ النابضِ	spring force
f	الترددُ	frequency
f_n	الترددُ التوافقيُّ ذو الرتبةِ n	nth harmonic frequency
k	ثابتُ النابضِ	spring constant
L	طولُ بندول أو خيطٍ مهتزٍّ أو عمودٍ هوائيٍّ مهتز	length of a pendulum, vibrating string, or vibrating column of air
l	طولُ مسارِ موجةٍ ضوئية	path length of light wave
λ	(لامبدا اليونانية) الطولُ الموجي	(Greek lambda) wavelength
m	رتبةُ أهدابِ التداخل	order number for interference fringes
n	عددٌ توافقي (الصوت)	harmonic number (sound)
n	مُعاملُ الانكسارِ	index of refraction
T	الزمنُ الدوريُّ للبندولِ (الحركةُ التوافقيةُ البسيطة)	period of a pendulum (simple harmonic motion)
θ	(ثيتا اليونانية) البُعدُ الزاويُّ لهدبةٍ بالنسبةِ إلى هدبةِ التداخلِ المركزية	(Greek theta) angle of fringe separation from center of interference pattern

رموزُ الكهرومغناطيسيّةِ المستعملةُ في هذا الكتاب

الرمز	الكمية	
$\vec{B}$, B	المجال المغناطيسي	magnatic field
(emf) $\mathcal{E}$	ق.د.ك (فرق الجهد) الناتجةُ من بطاريةٍ أو حثٍّ كهرومغناطيسي	e.m.f (potential difference) produced by a battery or electromagnetic induction
$\vec{F}_{مغناطيسية}$, $F_{مغناطيسية}$	القوةُ المغناطيسية	magnetic force
I	التيارُ الكهربائي	electric current
i	التيارُ اللحظي (دائرةُ تيارٍ متناوب)	instantaneous current (ac circuit)
I_m	التيارُ الأقصى (دائرةُ تيارٍ متناوب)	maximum current (ac circuit)
I_e	القيمةُ الفعّالةُ للتيّار المتناوب	root-mean-square current (ac circuit)
L	معاملُ الحثِّ الذاتي	coefficient of self inductance
l	طولُ موصِّلٍ كهربائيٍّ في مجالٍ مغناطيسي	length of an electrical conductor in a magnetic field
M	معاملُ الحثِّ المتبادل	coefficient of mutual inductance
n	عددُ اللفاتِ في ملفٍّ ناقلٍ للتيارِ أو ملفٍّ محوّل	number of turns in a current-carrying loop or a transformer coil
ΔV_e	القيمةُ الفعّالةُ لفرقِ الجهد	root-mean-square potential difference (ac circuit)
ω	(أوميكا اليونانية) الترددُ الزاوي	(Greek omega) angular frequency

الملحق (ج)

الوحداتُ في النظامِ الدوليِّ SI

الرمز	الدلالة	الكمية	الرمز	الدلالة	الكمية
A	أمبير	تيارٌ كهربائيّ	s	ثانية	زمن
K	كالفن	درجةُ الحرارةِ المطلقة	mol	المول	كميةُ المادة
kg	كيلوغرام	كتلة	cd	الكانديلا	شدةُ الإضاءة
m	متر	طول			

بعضُ بادئاتِ النظامِ الدوليِّ

البادئة	الرمز	العاملُ الأسيّ	معناه	مثال
ميكا Mega	**M**	$\mathbf{10^{6}}$	**1 000 000**	ميكامتر واحد $(Mm) = 1 \times 10^{6}$ متر
كيلو Kilo	**k**	$\mathbf{10^{3}}$	**1 000**	كيلومتر واحد $(km) = 1 \times 10^{3}$ متر
سنتي Centi	**c**	$\mathbf{10^{-2}}$	**1/100**	سنتيمتر واحد $(cm) = 1 \times 10^{-2}$ متر
ملّي Milli	**m**	$\mathbf{10^{-3}}$	**1/1000**	مليمتر واحد $(mm) = 1 \times 10^{-3}$ متر
ميكرو Micro	**µ**	$\mathbf{10^{-6}}$	**1/1 000 000**	ميكرومتر واحد $(\mu m) = 1 \times 10^{-6}$ متر

وحداتٌ أُخرى مقبولة مع نظام SI

الرمز	الاسم	الكمية	وحدة مكافئة
C	كولومب	الشحنةُ الكهربائية	$1\ A\bullet s$
°C	درجة سلزيوس	درجةُ الحرارة	$1\ K$
dB	ديسيبل	مستوى شدَّةِ الصوت	(بدون وحدة قياس)
eV	إلكترون فولت	طاقة	$1.60 \times 10^{-19}\ J$
F	فاراد	السعة	$1\frac{A^2\bullet s^4}{kg\bullet m^2} = 1\frac{C}{V}$
H	هنري	الحث	$1\frac{kg\bullet m^2}{A^2\bullet s^2} = 1\frac{J}{A^2}$
h	ساعة	زمن	$3.600 \times 10^3\ s$
Hz	هيرتز	تردُّد	$\frac{1}{s}$
J	جول	طاقة	$1\frac{kg\bullet m^2}{s^2} = 1\ N\bullet m$
kW•h	كيلوواط-ساعة	طاقة	$3.60 \times 10^6\ J$
L	لتر	حجم	$10^{-3}\ m^3$
min	دقيقة	زمن	$6.0 \times 10^1\ s$
N	نيوتن	قوة	$1\frac{kg\bullet m}{s^2}$
Pa	باسكال	ضغط	$1\frac{kg}{m\bullet s^2} = 1\frac{N}{m^2}$
rad	راديَن	إزاحةٌ زاويّة	(من دون وحدة قياس)
T	تسلا	شدَّةُ مجالٍ مغناطيسي	$1\frac{kg}{A\bullet s^2} = 1\frac{N}{A\bullet m} = 1\frac{V\bullet s}{m^2}$
u	وحدةُ كتلةٍ موحَّدة	كتلة (كتلة ذرّية)	$1.660\ 538\ 86 \times 10^{-27}\ kg$
V	فولت	فرقُ جهدٍ كهربائي	$1\frac{kg\bullet m^2}{A\bullet s^3} = 1\frac{J}{C}$
W	واط	قدرة	$1\frac{kg\bullet m^2}{s^3} = 1\frac{J}{s}$
Ω	أوم	مقاومة	$1\frac{kg\bullet m^2}{A^2\bullet s^3} = 1\frac{V}{A}$

الملحق (د): جداولُ مفيدة

سرعةُ الصوتِ في أوساطٍ مختلفةٍ

الوسط	v(m/s)	الوسط	v(m/s)	الوسط	v(m/s)
الغازات		السوائلُ عند 25°C		الأجسامُ الصلبةُ	
هواء (0°C)	331	كحولُ الميثل	1140	ألمنيوم	5100
هواء (25°C)	346	ماءُ البحرِ	1530	نحاس	3560
هواء (100°C)	366	ماء	1490	حديد	5130
هيليوم (0°C)	972			رصاص	1320
هيدروجين (0°C)	1290			مطّاط صلدٌ	54
أكسجين (0°C)	317				

تحويلُ الشدَّةِ إلى مستوى الشدَّةِ (dB)

الشدَّة (W/m²)	مستوى الشدَّة (dB)	أمثلة	الشدَّة (W/m²)	مستوى الشدَّة (dB)	أمثلة
1.0×10^{-12}	0	عتبةُ السمعِ	1.0×10^{-4}	80	ازدحامُ السيرِ، ساعةُ منبِّهٍ
1.0×10^{-11}	10	حفيفُ ورقِ الشجرِ	1.0×10^{-3}	90	قطّاعةُ خشبٍ
1.0×10^{-10}	20	همسٌ خفيفٌ	1.0×10^{-2}	100	قطارٌ كهربائيٌّ نفقيٌّ، مولِّدٌ كهربائيٌّ
1.0×10^{-9}	30	همس			
1.0×10^{-8}	40	أزيزُ بعوضةٍ	1.0×10^{-1}	110	منبِّهُ السيارةِ على بعدِ 1 m
1.0×10^{-7}	50	محادثةٌ عاديَّةٌ	1.0×10^{0}	120	عتبةُ الألمِ
1.0×10^{-6}	60	مكيِّفٌ يبعدُ 6 m	1.0×10^{1}	130	قصفُ الرعدِ، رشّاشٌ حربيٌّ
1.0×10^{-5}	70	مكنسةٌ كهربائيَّةٌ	1.0×10^{3}	150	طائرةٌ نفّاثةٌ قريبةٌ

بياناتٌ ذرّيةٌ مفيدة

الرمز	الكمية	القيمة المقيسة (الأساسية)	القيمة المعتمدة في حسابات الكتاب
m_e	كتلةُ إلكترون	$9.109\ 3826 \times 10^{-31}$ kg	9.109×10^{-31} kg
		$5.485\ 799\ 0945 \times 10^{-4}$ u	5.49×10^{-4} u
		0.510 998 918 MeV	5.110×10^{-1} MeV
m_n	كتلةُ نيوترون	$1.674\ 927\ 28 \times 10^{-27}$ kg	1.675×10^{-27} kg
		1.008 664 915 60 u	1.008 665 u
		939.565 360 MeV	9.396×10^{2} MeV
m_p	كتلةُ بروتون	$1.672\ 621\ 71 \times 10^{-27}$ kg	1.673×10^{-27} kg
		1.007 276 466 88 u	1.007 276 u
		938.272 029 MeV	9.383×10^{2} MeV

طيفُ الأمواجِ الكهرومغنطيسيَّةِ

اسمُ الأمواج	المدى	التطبيقات
الموجاتُ اللاسلكيَّةُ (الراديويّة)	$\lambda > 30$ cm $f < 1.0 \times 10^{9}$ Hz	موجاتُ الراديو AM و FM، وموجات التلفاز.
موجاتُ الميكروويف (الموجات الدقيقة)	30 cm $> \lambda > 1$ mm 1.0×10^{9} Hz $< f < 3.0 \times 10^{11}$ Hz	الرادارُ، والأبحاثُ الذرّيَّةُ والجزيئيَّةُ، والملاحةُ الجويَّةُ، وأفرانُ الموجاتِ الدقيقةِ (الميكروويف).
الموجاتُ تحتَ الحمراءِ (IR)	1 mm $> \lambda > 700$ nm 3.0×10^{11} Hz $< f < 4.3 \times 10^{14}$ Hz	الأطيافُ الجزيئيَّةُ الاهتزازيَّةُ، والتصويرُ الفوتوغرافيُّ (التصوير الليلي) بالأشعَّةِ تحتَ الحمراءِ، والعلاجُ الفيزيائيُّ.
الضوءُ المرئيُّ	700 nm(الأحمر) $> \lambda > 400$ nm(البنفسجي) 4.3×10^{14} Hz $< f < 7.5 \times 10^{14}$ Hz	التصويرُ الفوتوغرافيُّ بالأشعَّةِ المرئيَّةِ، والمجهرُ الضوئيُّ، وعلمُ الفلكِ البصريِّ.
الأشعَّةُ فوقَ البنفسجيَّةِ (UV)	400 nm $> \lambda > 60$ nm 7.5×10^{14} Hz $< f < 5.0 \times 10^{15}$ Hz	تعقيمُ الأجهزةِ الطبيَّةِ، وتمييزُ المعادنِ المفلورةِ.
أشعَّةُ X	60 nm $> \lambda > 10^{-4}$ nm 5.0×10^{15} Hz $< f < 3.0 \times 10^{21}$ Hz	الفحصُ الطبيُّ للعظامِ والأسنانِ والأنسجةِ المهمَّةِ، ومعالجةُ أنواعٍ من الأورامِ السرطانيَّةِ.
أشعَّةُ جاما	0.1 nm $> \lambda > 10^{-5}$ nm 3.0×10^{18} Hz $< f < 3.0 \times 10^{22}$ Hz	دراسةُ التشقُّقاتِ في تركيباتِ الموادِّ السميكةِ، ومعالجةُ الأمراضِ السرطانيَّةِ، وتعريضُ الأطعمةِ للإشعاعات.

كمِّياتٌ ثابتةٌ أساسية

الرمز	الكمية	القيمة الرسمية (الأساسية)	القيمة المعتمدة في حسابات الكتاب
c	سرعةُ الضوءِ في الفراغ	299 792 458 m/s	3.00×10^{8} m/s
e^{-}	شحنة الإلكترون	$1.602\ 176\ 53 \times 10^{-19}$ C	1.60×10^{-19} C
e^{1}	قاعدةُ اللوغاريتمِ الطبيعي	2.718 281 828	2.72
ε_o	ثابتُ العازليةِ في الفراغ	$8.854\ 187\ 817 \times 10^{-12}$ C²/(N•m²)	8.85×10^{-12} C²/(N•m²)
G	ثابتُ الجذبِ العام	$6.672\ 59 \times 10^{-11}$ N•m²/kg²	6.673×10^{-11} N•m²/kg²
g	تعجيل السقوطِ الحرِّ على سطحِ الأرض	9.806 65 m/s²	9.81 m/s²
h	ثابتُ بلانك	$6.626\ 0693 \times 10^{-34}$ J•s	6.63×10^{-34} J•s
k_C	ثابتُ كولومب	$8.987\ 551\ 787 \times 10^{9}$ N•m²/C²	8.99×10^{9} N•m²/C²
R	الثابتُ العامليُّ المولّيُّ للغاز	8.314 472 J/(mol•K)	8.31 J/(mol•K)
π	نسبةُ محيطِ الدائرةِ إلى قطرِها	3.141 592 654	القيمةُ التي تعطيها الآلةُ الحاسبة
μ_o	معامل النفاذيَّة المغناطيسيَّة للفراغ		$4\pi \times 10^{-7}$ T.m/A

عزم القصور الذاتي لبعض الأشكال

الشكل		عزمُ القصور الذاتيّ
	حلقةٌ رقيقةٌ حول محورِ تماثُلِها	MR^2
	حلقةٌ رقيقةٌ حول قطرِها	$\frac{1}{2}MR^2$
	جسيمٌ حول محور	MR^2
	قرصٌ أو أسطوانةٌ صلدة حول محورِ التماثل	$\frac{1}{2}MR^2$

الشكل		عزمُ القصور الذاتيّ
	قضيبٌ رقيقٌ حول محور عموديٍّ عليه ويمرُّ في مركزِهِ	$\frac{1}{12}Ml^2$
	قضيبٌ رقيقٌ حول محور عموديٍّ عليه ويمرُّ في طرفِه	$\frac{1}{3}Ml^2$
	كرةٌ صلدةٌ حول قطرِها	$\frac{2}{5}MR^2$
	قشرةٌ كرويةٌ حول قطرِها	$\frac{2}{3}MR^2$

أجوبةٌ عن مسائلَ مختارة

الفصل 1

تطبيق 1 (أ) ص 7

1. 0.38 m

تطبيق 1 (ب) ص 8

1. 0.76 s

تطبيق 1 (ج) ص 10

1. أ. $17\ rad/s^2$ ب. $0.038\ rad/s^2$
ج. $-6.3\ rad/s^2$

تطبيق 1 (د) ص 12

1. 31.0 rad/s

تطبيق 1 (هـ) ص 15

1. أ. 3.6 m/s ب. 15 rad/s
ج. 29 m/s د. 1.3 m

تطبيق 1 (و) ص 16

1. 1.5 m

تطبيق 1 (ز) ص 18

1. 58.7 m

تطبيق 1 (ح) ص 20

1. 29.6 kg

تطبيق 1 (ط) ص 23

1. 0.692 m

راجع وقيِّم ص 26-28

1. 180º نصف دورة
5. 4.1 m
7. أ. $821\ rad/s^2$
ب. $4.20 \times 10^3\ rad$

15. $1.5 \times 10^2\ rad/s$
27. $1.99 \times 10^{-27}\ rad/s$
29. أ. 161 m
ب. $5.49 \times 10^3\ N$
31. 1.02 m
33. أ. $0.965\ m/s^2$
ب. 0.0985
35. 8.3 s

الفصل 2

تطبيق 2 (أ) ص 36

1. أ. 5.1 N•m ب. 15 N•m

تطبيق 2 (ب) ص 42

1. $2.08 \times 10^5\ N$ ، $2.12 \times 10^5\ N$
3. أ. 0.86 m بالنسبة إلى الولد الذي وزنه 400.0 N
ب. 0.49 m بالنسبة إلى محور الدوران لجهة الولد الذي وزنه 300.0 N

تطبيق 2 (ج) ص 45

1. أ. $-0.87\ rad/s^2$ ب. –11 N•m

تطبيق 2 (د) ص 48

1. 24 rad/s

تطبيق 2 (هـ) ص 51

1. 12.0 m/s

راجع وقيِّم ص 55-58

9. أ. 6300 N•m ب. 550 N
11. ج
21. ضعف العزم المؤثر في الأسطوانة الثانية
23. 620 N•m

$36\ rad/s$ **.31**

220 **N .33**

885 N **.35**

.38 أ. 47 N
ب. $0.24\ kg{\cdot}m^2$
ج. $4.0 \times 10^1\ rad/s$

.40 $24\ rad/s^2$

الفصل 3

تطبيق 3 (أ) ص 65

.1 $2.7 \times 10^3\ N/m$

تطبيق 3 (ب) ص 73

.1 3.6 m

تطبيق 3 (ج) ص 75

.1 أ. 1.7 s، 0.59 Hz
ب. 1.14 s، 7.1 Hz

تطبيق 3 (د) ص 81

.1 أ. 3.41 m
ب. $5.0 \times 10^{-7}\ m$
ج. $1.0 \times 10^{-10}\ m$

راجع وقيِّم ص 90-92

.13 أ. 2.00 s
ب. $9.812\ m/s^2$
ج. $9.798\ m/s^2$

.19 $\frac{1}{3}$ s، 3 Hz

.25 أ. 9.0 cm
ب. 20.0 cm
ج. 0.0400 s
د. 5.00 m/s

.29 y_3

.35 2.0 Hz، 0.50 s، 0.30 m/s

.37 $9.70\ m/s^2$

الفصل 4

تطبيق 4 (أ) ص 106

.1 $8.91 \times 10^{-3}\ W/m^2$

تطبيق 4 (ب) ص 117

.1 440 Hz

.3 440 m/s

راجع وقيِّم ص 121-123

.13 1079.4 Hz

.21 $7.96 \times 10^{-2}\ W/m^2$

.23 أ. 4.0 m ب. 2.0 m
ج. 1.3 m د. 1.0 m

.29 443 Hz، 886 Hz، 1330 Hz

.31 52 cm

.33 0.20 s

.35 $L_{\text{المقفل}} = 1.5\ (L_{\text{المفتوح}})$

.37 أ. $f' = f\dfrac{v}{v - v_s}$
ب. الحائط
ج. 20 m/s

الفصل 5

تطبيق 5 (أ) ص 131

.1 أ. 2×10^{-5} T في اتِّجاه المحور z الموجب
ب. 2×10^{-5} T في اتِّجاه المحور z السالب

تطبيق 5 (ب) ص 133

.1 1.3×10^{-3} T

تطبيق 5 (ج) ص 135

1. أ. 40000 لفَّة /m
   ب. 0.05 T

تطبيق 5 (د) ص 138

1. 1.5×10^6 m/s نحو الشمال

تطبيق 5 (هـ) ص 141

1. 1.7×10^{-7} T في اتِّجاه المحور z الموجب
3. 1.5 T

راجع وقيِّم ص 145-147

1. اثنان
21. 2.1×10^{-3} m/s
23. 0.55 Ω
25. على بُعد 0.5 m من السلك A
29. 2.1×10^{-2} T في اتِّجاه المحور y السالب
31. 8.0×10^{-3} T في اتِّجاه المحور z الموجب
33. 1.39×10^{-2} T نحو المراقب
34. أ. 0.01 A
    ب. 2500 Ω، 14500 Ω

الفصل 6

تطبيق 6 (أ) ص 159

1. –2 V

تطبيق 6 (ب) ص 161

1. 0.30 V
3. 0.14 V

تطبيق 6 (ج) ص 172

1. أ. 7.42 A
   ب. 14.8 Ω
3. أ. 1.10×10^2 V
   ب. 2.1 A

تطبيق 6 (د) ص 173

1. 0.707 A، 0.5 A
3. 1500 J

تطبيق 6 (هـ) ص 175

1. 25 Ω

تطبيق 6 (و) ص 176

1. 795 Ω

تطبيق 6 (ز) ص 179

1. 118 Ω، فرق الجهد يتقدّم التيار بطور 0.56 rad
3. التيار يتقدّم فرق الجهد بطور 1.54 rad

تطبيق 6 (ح) ص 183

1. 3.5×10^4 لفّة

تطبيق 6 (ط) ص 186

1. 300 kW

راجع وقيِّم ص 188-192

11. 0.12 A
27. 3.1×10^5 V
35. 48 لفّة
37. 11 لفّة
39. 5 V
41. 10 A
43. أ. 1.84 A
    ب. 289 V ، 39 V
45. 1.33 A
47. 4.2×10^{-2} T
49. 89 Hz ، 245 V

51. أ. 28 kW
ب. 3.6×10^5 kW

53. أ. 100 Ω
ب. 2 A
ج. 44 μF
د. $2.5\sqrt{2}\sin(120\pi t)$

55. أ. 36 V
ب. 56.92 V
ج. رسم

الفصل 7

تطبيق 7 (أ) ص 203

1. 574 nm

3. 25.2°

تطبيق 7 (ب) ص 210

1. 0.02°، 0.04°، 0.11°

3. 11

راجع وقيِّم ص 219-218

9. 630 nm

15. 3.22°

21. 2.41×10^{-4} m

23. 8.000×10^{-7} m

الفصل 8

تطبيق 8 (أ) ص 227

1. 2.0 Hz

3. 1.2×10^{15} Hz

تطبيق 8 (ب) ص 230

1. 4.83×10^{14} Hz

3. 2.36 eV

تطبيق 8 (ج) ص 241

1. 4.56×10^{14} Hz، المستوى 4

3. 4.83×10^{13} Hz

5. 10، من E_6 إلى E_2، المستوى 1

راجع وقيِّم ص 245-244

11. 4.8×10^{17} Hz

13. 1.2×10^{15} Hz

23. أ. 2.46×10^{15} Hz
ب. 2.92×10^{15} Hz
ج. 3.08×10^{15} Hz
د. 3.15×10^{15} Hz

25. 2.00 eV

27. 0.80 eV

الفصل 9

راجع وقيِّم ص 271-270

3. ج-هـ-و

7. إلى اليسار، إلى اليمين

9. إلكترونات سالبة

13. أ. عكس اتّجاه السهم
ب. في اتّجاه السهم

19. أكبر من واحد

21. الزخم الخطّي

25. أ. 2.75×10^{14} Hz
ب. 1.09×10^{-6} m

27. 1 eV

المفردات

أ

الإزاحةُ الزاويّة Angular displacement ص 6

زاويةُ دورانِ نقطةٍ أو محورٍ أو جسم في اتجاهٍ معيَّنٍ حول محورٍ ثابت.

إزاحةُ كُمبتُن Compton shift ص 232

زيادةٌ في الطولِ الموجيِّ للفوتونِ المشتّتِ بوساطةِ إلكترونٍ، بالنسبةِ إلى الطولِ الموجيِّ للفوتونِ الساقطِ.

الإشابة Doping ص 257

إضافةُ ذرّاتٍ شائبة إلى شبه الموصّل.

إشعاعُ الجسمِ الأسود

Blackbody radiation ص 224

الإشعاعُ المُنبعثُ من جسمٍ أسودَ، والذي يشعُّ ويُمتصُّ بشكلٍ مثاليٍّ، ويبعثُ إشعاعاتٍ تعتمدُ فقط على درجةِ حرارتِه.

إلكترون التكافؤ Valence electron ص 251

إلكترون موجود في الطبقة الخارجية الأبعد من نواة الذرَّة.

الانضغاط Compression ص 98

منطقةٌ في الموجةِ الطوليَّةِ حيث يبلغُ الضغطُ أقصى قيمةٍ له.

ب

البطن Antinode ص 87

نقطةٌ في موجةٍ واقفةٍ، تقعُ في منتصفِ المسافةِ بينَ عقدتَيْن، وعندها تبلغُ السعةُ أقصاها.

البلورةُ الثنائية Diode ص 258

جهازٌ إلكتروني يسمحُ للتيارِ الكهربائيِّ بالمرورِ بسهولةٍ في اتّجاهٍ واحدٍ بالمقارنةِ مع اتّجاهِ الآخر.

ت

تأثيرُ دوپلر Doppler effect ص 103

تغيُّرٌ ملحوظٌ في الترددِ نتيجةً للحركةِ النسبيَّةِ بين مصدرِ الموجاتِ والمُراقِبِ.

التأثيرُ الكهروضوئيُّ

Photoelectric effect ص 228

انبعاثٌ للإلكتروناتِ من سطحِ مادَّةٍ، يحدثُ عندَما يشعُّ ضوءٌ بتردُّداتٍ معيَّنةٍ على سطحِ المادَّةِ.

التخلخل Rarefaction ص 98

منطقةٌ في الموجةِ الطوليَّةِ حيث يبلغُ الضغطُ أدنى قيمةٍ له.

التداخلُ الإتلافي

Destructive interference ص 85

التداخلُ الذي يحدثُ عندَ التقاءِ إزاحاتِ جسيماتِ الوسطِ التي تقعُ على جهتَيْن متعاكستَيْن من موقعِ الاتّزان، لتشكّلَ إزاحةً محصّلةً أصغرَ من كلِّ إزاحةٍ منفردةٍ لكلِّ جسيمٍ.

التداخلُ البنّاء

Constructive interference ص 84

التداخلُ الذي يحدثُ عندَ التقاءِ إزاحاتٍ منفردةٍ تقعُ على الجهةِ نفسِها من موضعِ الاتّزانِ لتشكّلَ موجةً محصّلةً.

الترابط (التشاكه) Coherence ص 199

ثباتُ فرقِ الطورِ بينَ موجتَين أو أكثرَ.

الترانزيستور Transistor ص 261

جهازٌ له عادة ثلاثة أسلاك للتوصيل ويمكنه تضخيم إشارة.

الترددُ Frequency ص 70

عددُ الدوراتِ أو الاهتزازاتِ في وحدةِ الزمنِ.

الترددُ الأساسيُّ

Fundamental frequency ص 112

أقلُّ ترددٍ محتملٍ للموجةِ الواقفةِ.

التعجيلُ الزاوي Angular acceleration ص 9

المعدلُ الزمنيُّ لتغيُّرِ السرعةِ الزاويّةِ. وهو يقاسُ بالرادّيَن في ثانية^2.

التعجيلُ المركزي

Centripetal acceleration ص 17

المعدّل الزمني لتغيُّرِ اتّجاه سرعة جسم عندما يتحرّكُ على مسارٍ دائري.

التعجيلُ المماسي

Tangential acceleration ص 15

التعجيلُ الخطيُّ اللحظيّ لجسمٍ في الاتجاهِ المماسيِّ للحركةِ الدائريةِ للجسمِ أو المعدَّل الزمني لتغير مقدار السرعة اللحظية لجسم في الاتّجاه المماسي لحركته الدائرية.

التيّار الحثي ص 152

تيّار كهربائي متولّد في دائرة كهربائية مغلقة بسبب حركتها النسبية داخل المجال المغناطيسي.

التياراتُ الدوامية Eddy currents ص 162

التيّاراتُ الحلقية المحتثّة داخل المادّة الفلزّية.

التيّارُ المتناوب Alternating current ص 165

تيّارٌ كهربائيٌّ يغيّرُ اتّجاهَهُ في فتراتٍ زمنيَّةٍ متساويةٍ ومقدارُهُ كلَّ لحظةٍ.

ث

الثقب Hole ص 256

مستوى طاقة شبه موصّل ليس فيه إلكترون.

ج

الجرْس (نوع الصوت) Timbre ص 117

النغمةُ التي تنتجُ عن مزج توافقيّات مختلفة الشدَّة.

جهازُ الليزر Laser source ص 211

جهازٌ يُصدِرُ ضوءًا متشاكهًا له طولٌ موجيٌّ واحدٌ.

ح

الحالةُ الأرضية Ground state ص 251

حالةُ الطاقة الأدنى لمنظومة مكمّاة.

الحالةُ المستثارة Excited state ص 251

حالةُ ذرّة ليست في الحالة الأرضية.

الحثُّ الذاتيُّ Self induction ص 157

توليدُ قوّةٍ دافعةٍ كهربائيَّةٍ في ملفٍّ نتيجةَ تغيُّرِ شدَّةِ التيّارِ المارِّ فيه.

الحثُّ الكهرومغناطيسيُّ

Electromagnetic induction ص 152

عمليةُ إنتاجِ تيّارٍ كهربائيٍّ في موصّلٍ من دائرةٍ مغلقةٍ، بتغييرِ التدفّقِ المغناطيسيِّ خلالَه.

الحثُّ المُتبادَلُ Mutual inductance ص 168

عمليَّةُ تولُّدُ قوّةً دافعةً كهربائيَّةً في إحدى الدائرتَيْن نتيجةَ تغيُّرِ شدَّةِ التيّارِ في الدائرةِ الأُخرى.

الحركةُ التوافقيَّةُ البسيطة

Simple harmonic motion ص 63

اهتزازُ جسمٍ حولَ نقطةِ اتّزانٍ تتناسبُ فيه قوةُ الإرجاعِ طرديًّا مع الإزاحةِ من موقعِ الاتّزانِ وباتّجاهٍ معاكس.

الحركةُ الدورانية Rotational motion ص 4

حركةُ جسمٍ يدورُ حول محورٍ معيّن.

الحيود Diffraction ص 204

انحرافُ اتّجاهِ موجةٍ عند اصطدامها بعائقٍ أو فتحةٍ أو حافةٍ.

د

دالّةُ الشغل Work function ص 229

أدنى كمّيَّةٍ من الطاقةِ مطلوبةٍ لنزعِ إلكترونٍ من سطحِ المعدن.

درجةُ الصوتِ Pitch ص 99

مقياسُ مدى حدّةِ الصوتِ المسموعِ أو غلظتِه، تبعًا لتردُّدِ الموجةِ الصوتيَّةِ.

الديسيبل Decibel ص 107

وحدةٌ بلا بُعدٍ تقيسُ مستوى شدَّةِ الصوتِ.

ذ

ذراعُ الدوران Lever arm ص 33

المسافةُ العموديةُ من محورِ الدوران إلى الخطِّ المرسومِ على امتدادِ القوة.

ر

الرادين Radian ص 5

زاويةُ طولُ قوسِها يساوي نصفَ قطرِها، وهي تساوي 57.3° تقريبًا.

رقمُ الرتبةِ Order number ص 201
رقمُ الهدبةِ بالنسبةِ إلى الهدبةِ المركزيَّةِ المضيئةِ.

الرنين Resonance ص 109
ظاهرةٌ تحدثُ عندما يتطابقُ تردُّدُ نظامٍ معيَّنٍ مع الترَدُّدِ الطبيعيِّ لاهتزازاتِ النظامِ، مسبِّبةً اهتزازةً ذاتَ سعةٍ هائلةٍ.

ز

الزخم الزاوي Angular momentum ص 46
حاصلُ ضربِ عزم القصور الذاتيّ لجسمٍ حول محورِ الدورانِ وسرعته الزواية حول المحورِ نفسِه.

الزمنُ الدوريُّ Period ص 70
الزمنُ المستغرَقُ لتنفيذِ دورةٍ حركيَّةٍ كاملةٍ.

س

السرعةُ الزاوية Angular speed ص 7
المعدَّلُ الزمني لدورانِ جسمٍ حولَ محورٍ معيَّنٍ أو المعدَّل الزمني لتغير الإزاحة الزاوية، وتقاسُ بالراديَن في الثانية.

السرعةُ المماسية Tangential speed ص 13
السرعةُ الخطيةُ اللحظيةُ لجسمٍ في الاتجاهِ المماسيِّ لمسارهِ الدائري.

السعةُ Amplitude ص 70
الإزاحةُ القصوى من نقطةِ الاتِّزانِ.

ش

شدَّةُ الموجةِ Wave intensity ص 105
المعدَّلُ الزمني لانتقالِ طاقةِ الموجةِ عبرَ وحدةِ مساحةٍ متعامدةٍ مع اتِّجاهِ حركةِ الموجةِ.

ط

الطاقةُ الحركية الدورانية ص 49
Rotational kinetic energy
طاقةُ الجسمِ الناتجة عن دورانه.

الطولُ الموجيُّ Wavelength ص 78
المسافةُ بين نقطتَيْن متتاليتَيْن متَّفقتَيْن في الطورِ على الموجةِ.

طيفُ الامتصاص Absorption spectrum ص 236
خطوطٌ سوداءُ تشيرُ إلى الأطوالِ الموجيَّةِ للطاقةِ التي تمتصُّها المادَّةُ.

طيفُ الانبعاثِ Emission spectrum ص 235
خطوطٌ ملوَّنةٌ تشيرُ إلى الأطوالِ الموجيَّةِ للطاقةِ المشعَّةِ والمنبعثةِ من مادَّةٍ.

ع

العزم Torque ص 33
كمّيّةٌ تعبِّر عن مقدرةِ القوةِ على جعلِ جسمٍ يدورُ حول محورٍ معيّن.

عزمُ القصورِ الذاتيّ Moment of interia ص 38
هي مقدارِ مقاومة الجسم لأي تغير في الحركة الدورانية.

العقدة Node ص 87
نقطةٌ في موجةٍ واقفةٍ، يحدثُ عندَها دائمًا تداخلٌ إتلافي كامل وهي ساكنةٌ.

ف

فجوة الطاقة Energy gap ص 252
مدى الطاقة الفاصل بين أعلى حزمة طاقة مشغولة بالإلكترونات، وأسفل حزمة طاقة خالية من الإلكترونات.

فرقُ المسارِ Path difference ص 201
الفرقُ بين المسافتَيْن اللتَيْن تقطعُهما موجتانِ تصدرانِ من مصدرَيْن عندَ وصولِهما إلى نقطةٍ واحدةٍ.

الفوتون Photon ص 229
أصغر كم من الإشعاع الكهرومغناطيسي وكتلته صفر.

ق

القعر Trough ص 78
النقطةُ الواقعةُ عندَ أقصى إزاحةٍ سالبةٍ من موقعِ الاتِّزانِ.

القمة Crest ص 78
النقطةُ الواقعةُ عند أقصى إزاحةٍ موجبةٍ من موقعِ الاتِّزانِ.

قوةُ الجاذبية Gravitational force ص 21
قوةُ التجاذبِ المتبادلِ بين أيِّ جسَيْمَيْن.

القوّةُ الدافعةُ الكهربائيَّةُ المحتثّة المضادَّةُ
Back emf ص 166
القوّةُ الدافعةُ الكهربائيَّةُ المحتثَّةُ في ملفٍّ محرِّكٍ، والتي تؤدّي إلى خفضِ التيّارِ فيه.

القوة المركزية Central force ص 19
هي محصلة القوى المؤثّرة في جسم يتحرَّك على مسار دائري والتي تتجه نحو مركز المسار.

القيمةُ الفعّالةُ للتيّار
Effective current (rms) ص 170
قيمةُ التيّارِ المتناوبِ الذي يولِّدُ ما يولِّدُهُ تيّارٌ مستمرٌّ من تأثيرٍ حراريٍّ في الفترةِ نفسِها.

ل

الليزر Laser ص 211
تضخيم الضوء بالانبعاث المحفّز للإشعاع.

م

مبدأُ تراكبِ الموجات
Superposition principle ص 84
عندَما تلتقي موجتان أو أكثر في وسطٍ واحدٍ، فإن إزاحةَ جسيماتِ الوسطِ تساوي مجموعَ إزاحاتِ الجسيماتِ الناتجةِ عن كلِّ موجةٍ على حِدةٍ.

متجهُ المساحة Area vector ص 129
متجه مقداره المساحة المذكورة واتّجاهه هو الاتجاه العمودي لتلك المساحة.

المتسلسلاتُ التوافقيَّةُ Harmonic series ص 113
متسلسلاتٌ من الترددّاتِ تشملُ الترددَ الأساسيَّ ومضاعَفاتِه.

المجالُ المغناطيسيُّ Magnetic field ص 128
منطقةٌ يمكنُ قياسُ قوّةٍ مغناطيسيَّةٍ فيها.

المحوِّل Transformer ص 181
جهاز يرفعُ القوَّةَ الدافعةَ الكهربائيَّةَ لتيّارٍ متناوبٍ، أو تخفضُها.

مركزُ الكتلة Center of mass ص 37
نقطةٌ يمكنُ تجميعُ كلِّ كتلةِ الجسمِ عليها عندَ دراسةِ حركتِه.

معاملُ الحثّ الذاتيِّ
Coefficient of self induction ص 157
النسبةُ بين القوة الدافعة الكهربائية المحتثة في دائرة كهربائية إلى المعدل الزمني لتغير شدّة التيار المار فيها.

المقاوَمة الصرفة Pure resistor ص 172
مقاومة ليس لها حثّ ذاتيّ ($L = 0$).

الممانعة الحثية Inductive impedance ص 174
نسبة القيمة القصوى لفرق الجهد في ملفّ حثّي نقي إلى القيمةِ القصوى للتيّار المارّ فيه، في دائرة تيّار متناوب.

الممانعة السعوية
Capacitive impedance ص 175
نسبة القيمة القصوى لفرق الجهد حول طرفَي مكثّف إلى القيمة القصوى للتيّار في دائرة تيّار متناوب.

الموجةُ الطولية Longitudinal wave ص 79
الموجةُ التي تهتزُّ فيها جزيئاتُ الوسطِ في اتجاهٍ موازٍ لاتجاهِ حركةِ الموجة.

الموجةُ المستعرضة Transverse wave ص 78
الموجةُ التي تهتزُّ فيها جزيئات الوسط في اتجاهٍ متعامدٍ مع اتجاهِ حركةِ الموجة.

الموجةُ الميكانيكية Mechanical wave ص 76
الموجةُ التي تحتاجُ إلى وسطٍ ماديٍّ تنتقلُ خلالَه.

الموجةُ الواقفة Standing wave ص 87
نمطٌ موجيٌّ ينتجُ عن تداخلِ موجتَين لهُما الترددُّ والطولُ الموجيُّ والسعةُ نفسُها، وتنتقلان في اتجاهَين متعاكسين.

المولِّد Generator ص 163
آلة تحوِّل الطاقةَ المكيانيكيَّةَ إلى طاقةٍ كهربائيَّةٍ.

ن

نكبةُ فوقَ البنفسجي
Ultraviolet catastrophe ص 225
التوقُّعُ الخاطئُ للفيزياءِ التقليديَّةِ والذي يفترضُ أن الطاقة التي يشعها الجسم الأسود تزداد زيادة هائلة عند اقتراب الأطوال الموجية من الصفر.

و

الوسط Medium ص 76
المادةُ التي يعبرُها الاضطرابُ الموجيُّ.

